

季冻区土质边坡滑动界面临界深度的试验研究

程永春, 葛琪, 何锋

(吉林大学 交通学院, 长春 130022)

摘要: 为研究季节冰冻区土质边坡春融期常发生的浅层滑坡灾害, 考虑盐水冰点低于水的冰点这一物理特性, 设计了模拟土坡内部冻融界面的试验方法。比较了在不同含水率时, 经冻融循环后土质边坡滑动面的临界深度, 验证了在冻融界面上土质边坡的破坏形态, 根据试验结果拟合了符合本文土样条件的土质边坡滑动界面临界深度的损伤模型。分析表明, 冻融循环后, 随含水率和冻融循环次数的增加, 边坡滑动破坏的临界深度值逐渐减小, 经对试验数据拟合提出的临界深度随冻融循环损伤模型, 可为季节冰冻区的边坡设计提供参考。

关键词: 土质边坡滑移; 冻融模拟试验; 土体损伤系数

中图分类号: U 412.22

文献标识码: A

Experimental research on critical depth of slip surface of soil slope in seasonal frozen area

CHENG Yong-chun, GE Qi, HE Feng

(College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to study the shallow landslide hazard of soil slope during the spring melt period in seasonal frozen areas, considering that the freezing point of the brine is lower than pure water, a simulated test method of the internal freezing and thawing interface of soil slope is designed. The critical slip surface depths after freeze-thaw circles in different water contents are compared in the test; and the failure modes of the internal freezing and thawing interface of soil slope are verified. Then the sliding face depth damage model of the soil slope is put forward according to the experimental data. The results demonstrate that with the increasing water content and freeze-thaw circle times, the value of critical slip surface depth decreases gradually after freeze-thaw circles; the damage model which is obtained from the experimental data fitting, would present more reference of the slope design in the seasonal frozen area.

Key words: soil slope landslide; freezing and thawing simulated test; soil damage coefficient

1 引言

在路堤、基坑开挖、渠道、堤防等工程中, 土质边坡往往属于工程的一部分。对于季节冰冻区, 处于春融期的土质边坡, 由于冻结土和融化土体之间存在冻融交界面, 当含水率增大时富水聚集于界面处, 使该处的抗剪强度降低。当土坡在荷载作用下的剪应力达到其抗剪强度时, 边坡的稳定性丧失, 进而产生病害。

目前对季节冰冻区土质边坡的稳定性分析, 普遍采用极限状态下的力学分析方法^[1-2]。随着研究

的深入, 许多学者在土体受力的前提下, 同时考虑了已饱和和土体内部的渗流力作用^[3-5], 并且进行边坡滑面搜索^[6]。考虑冻土与融土之间的抗剪强度因冻融循环作用将受到损伤的实际状况^[7-8], 有必要根据试验结果研究经历冻融循环后边坡界面破坏形态及滑面的临界深度, 进而建立边坡稳定性方程, 提出内部滑移界面临界深度损伤模型, 分析该面深度的分布规律, 为季节冰冻区道路边坡设计提供依据, 同时为该地区道路边坡的稳定性监测提供数据参考。

收稿日期: 2009-06-29

基金项目: 863 国家高科技发展计划项目(项目号: 2009AA11Z104); 吉林大学创新团队资助项目(2009)。

第一作者简介: 程永春, 男, 1961 年生, 教授, 博士生导师, 从事道路工程材料试验与理论研究。

通讯作者: 何锋, 男, 1965 生, 讲师, 研究方向: 道路工程。E-mail: jddaoqiao@163.com。

2 边坡稳定性试验

2.1 试验原理与方法

在土工结构中,土的自重引起的应力通常占支配地位,而常规小比例尺模型试验由于其自重产生的应力远低于原型。工程中常用小比例尺的模型试验去揭示和分析现象的本质和内在机制,以验证理论和解决工程实际问题^[9],因此,为模拟自重应力场,本文设计小比例尺模型试验,采用边坡顶面加载的方式来模拟冻融界面滑移过程。调整底板的角度,模拟边坡角的大小,如图1所示。

2.1.1 用外力加载方式模拟土体应力

制作土的试件使其与底板稳合,且在下方用挡板使其固定在斜坡上。当试样上面施加外力时,试件本身将受到外力和自重的共同作用,在斜坡方向上产生下滑力,其大小为已知量。图1中试样尺寸为 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 。下层(冻层)深度为 2 cm ,体积为 200 cm^3 。上层(融层)深度为 3 cm ,体积为 300 cm^3 。

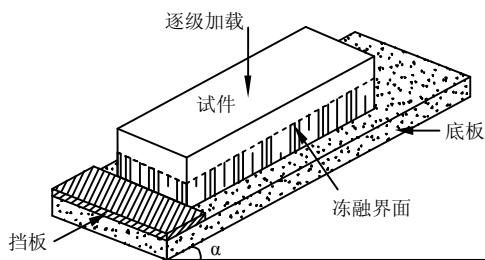


图1 试验设计示意图

Fig.1 Sketch of experiment design

2.1.2 冻融界面的模拟试验

为保证所制作试件的整体性,试验选用同一种土样制作。试件下层由含普通水的土样制作,上层由含 1% 浓度盐水的土样制作。考虑盐水冰点低于水的冰点这一物理特性,因此在 -3°C 的试验温度下,下层土体冻结,成为冻层;上层土体为不冻状态,即融化层,它们的界面形成冻融界面。考虑到两种土质的强度差异,程永春等^[10]对冻融界面进行直剪试验,对比普通土试样与冻融界面试样的直剪试验结果,提出冻融界面抗剪强度修正系数为 0.946 。

在 -3°C 的试验温度下,将试件置于倾斜底板上,模拟道路边坡。在试件上分级加载,至试件破坏。将破坏时试件上部所加荷载换算成土的高度,由此可知,破坏时冻融界面上土的高度,即破坏时冻融

面的深度。

2.2 试验过程与试验结果

2.2.1 有冻融界面的滑移临界深度承载试验

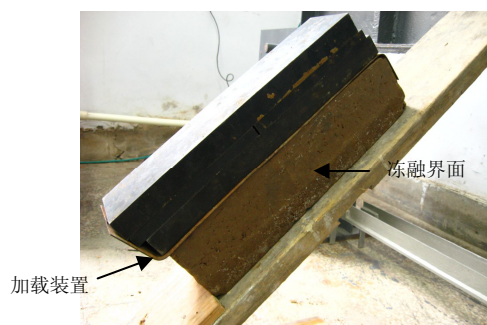
试验选用长春地区的粉质黏土,其基本指标如表1所示。

表1 土样的各基本指标

Table 1 The basic parameters of the soil		
天然含水率/%	最大干密度/(g/cm^3)	最佳含水率/%
3.2	1.68	21

试件融土层(上层)采用 1% 盐水进行配比,冻土层采用普通水进行配比。在试验温度条件下,普通水配比的土样冻结,盐水配比土样处于正融状态,形成冻融界面。以土样最佳含水率 21% 为基础,根据其他学者对土质含水率变化的研究^[11],设计融土层盐水含水率分别为 16% 、 18.5% 、 21% ,冻土层普通水的含水率均为 16% ,分析土坡滑动界面临界深度的变化。

温度 -3°C 时,对试件进行加载试验。如图2(a)所示,试件设计专用加载装置,用砝码逐级加载。当荷载达到某一值时,在冻融界面上土体出现裂缝并开始滑动,直至完全分离,如图2(b)所示。



(a) 加载前的试件



(b) 有冻融界面试件的最终破坏形式

图2 边坡的破坏过程示意图

Fig.2 The sketch of breaking process of the test

可以发现,试件破坏时,相对滑动截面为冻融界面,而且滑动截面近似为平行于冻融界面的直线。有冻融界面试件承载试验的结果如表2所示。

表 2 有冻融界面试件的承载试验结果

Table 2 The test results of F-T interface specimens

含水率/%	荷载/kg	临界深度 H/m
16.0	65.5	2.88
18.5	60.3	2.65
21.0	36.8	1.63

2.2.2 无冻融界面的滑移临界深度承载试验

采用与有冻融界面试件相同的土样,用普通水进行配比制件,设计土样的含水率为 16%, 18.5%, 21%。在 5℃ 状态下采用同样方法进行试验,将试验结果与冻融界面承载试验结果进行对比。普通试件的破坏形态如图 3 所示。



图 3 普通土试件破坏形式

Fig.3 The final broken forms of normal specimen

可以发现,无冻融界面试件滑移破坏的最终形态不同于有冻融界面的试件,其滑动面并不规则,但近似为一条斜直线。试件的破坏是由于逐级施加的荷载对土体产生的剪应力达到了土样的抗剪强度,导致试件发生剪切破坏。

无冻融界面承载试验的结果如表 3 所示。

表 3 无冻融界面试件的承载试验结果

Table 3 The test results of no F-T interface specimens

含水率/%	荷载/kg	临界深度 H/m
16.0	84.2	3.70
18.5	71.6	3.14
21.0	48.1	2.12

2.2.3 冻融循环条件下滑移临界深度的承载试验

通过对比前两组试验结果可知,有冻融界面试件的承载能力明显低于无冻融界面试件。因此,有必要结合季节冻土区特有的冻融循环条件对其进行同样的承载试验,研究临界深度的变化规律。

采用同样土体,设计融土层中 1% 盐含水量为 18.5%,冻土层普通水含率为 16%,在试验温度下形成冻融界面。试件经过 n (1~5) 次冻融循环后进行加载试验,观察临界深度的变化。试验结果列于表 4 中。

表 4 冻融循环条件下试件的承载试验结果

Table 4 The results of F-T interface samples after F-T cycles

冻融循环次数 n	荷载/kg	临界深度 H/m
1	57.3	2.52
2	51.1	2.25
3	45.3	1.99
4	44.2	1.95
5	40.5	1.79

3 试验结果的数据分析

试验数据表明,由于冻融循环作用时水分的迁移,导致冻融界面上的抗剪强度明显低于已融土的抗剪强度,同时滑动破坏面在冻融界面上。由于冻融循环对土体自身性质有较大影响,对不同冻融循环次数以及不同含水率对临界深度产生影响的研究十分必要。

破坏时试件上部施加的荷载总重为 m_s ,即试验临界荷载,由于两种材料密度不同,需要将砝码重量转换为土体高度,实现对临界深度的计算。此处提出土体高度换算系数:

$$\xi = \frac{m_s}{\rho_0 A} \quad (1)$$

式中: m_s 为坡面处添加的荷载质量; ρ_0 为融土的饱和密度; A 为斜坡坡面面积 $A = l_1 l_2$ 。

利用土体高度换算系数,试件的融土层厚度为 3 cm,可确定边坡破坏临界深度 $H = \xi + 0.03$ 。

3.1 有、无冻融界面试件的临界深度比较

图 4 对比了在不同含水率情况下有冻融界面试件与无冻融界面试件的临界深度值关系。

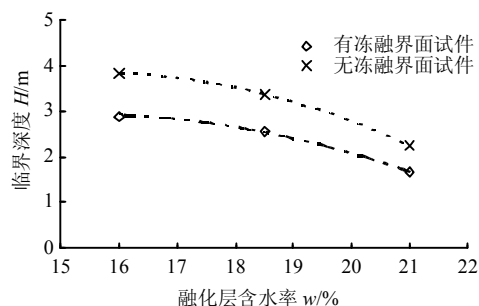


图 4 普通试件界面与冻融界面临界深度比较

Fig.4 The critical depth comparison between normal specimens and freezing-thawing interface specimens

由图可以发现,相同含水率条件下冻融界面试件的临界深度明显低于普通土试件,冻融界面的临界深度约为普通试件的 70%,因此,在季节冰冻区

对边坡进行安全分析时, 需对冻融界面进行更为深入的研究。

3.2 不同含水率对冻融界面滑移临界深度的影响

针对不同含水率对冻融界面临界深度的影响, 通过试验结果比较了不同含水率时临界深度 H , 如图 5 所示。

可以看出, 随着含水率的变大, 临界深度变小, 这是由于随着含水率的变化, 土体黏聚力值明显降低, 相应的换算高度也降低。试验结果也是与现实情况相吻合的。

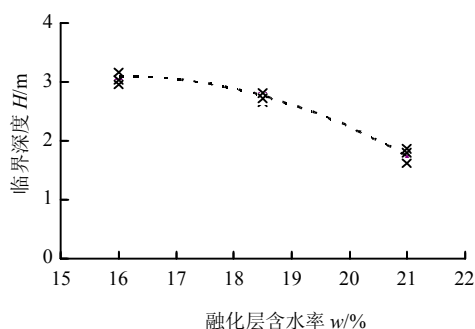


图 5 不同含水率时冻融界面的临界深度
Fig.5 The critical depth comparison with different water contents

3.3 不同冻融循环次数对临界深度的影响

结合试验结果, 图 6 比较了本文所设计的中间含水率为 18.5% 情况下, 边坡滑动面的临界深度值 H 与冻融循环次数 n 的关系。

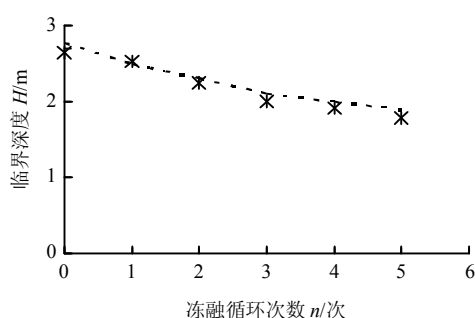


图 6 不同随冻融循环次数时临界深度的比较
Fig.6 The critical depth comparison with different $F-T$ times

可以看出, 随着冻融次数的增加, 临界深度结果降低, 且降幅趋于缓和。这是由于随着冻融次数增加, 土体的孔隙比逐渐增大, 当趋于临界孔隙比时, 土体强度逐渐趋于稳定。

3.4 临界深度的冻融循环损伤系数

鉴于含水率是边坡稳定性的直接影响因素, 选取最佳含水率 21% 进行临界深度的拟合分析。为定

量分析冻融循环对滑坡断面临界深度的影响, 定义:

$$\eta = \frac{H_n}{H_0} \quad (2)$$

式中: η 为滑坡临界深度的损伤系数; H_n 为 n 次冻融循环后土坡临界滑动面的深度; H_0 为未经冻融循环时土质边坡临界滑动深度。

根据试验数据, 采用广义最小二乘法, 对试验结果进行拟合分析, 确定季冻区土质边坡滑坡时临界深度的损伤模型为

$$\eta = 0.452e^{-0.252n} + 0.548 \quad (3)$$

将损伤模型的拟合值与试验结果进行对比, 如图 7 所示。

可以看出, 随着冻融循环次数的增加, 土质边坡由于冻融界面抗剪强度的损伤, 发生滑坡的临界深度值在不断减小, 其极限值可达到原始深度的 55%, 使得原本设计合理的土坡结构, 可能在春融期发展为浅层滑坡, 在季节冰冻区的边坡设计中值得注意。

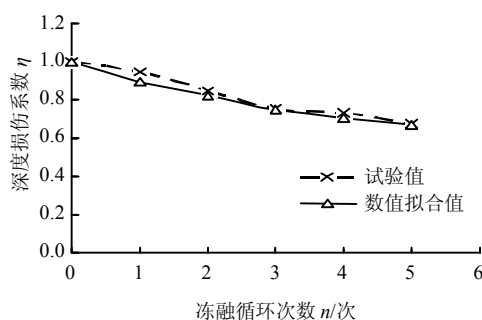


图 7 临界深度损伤的拟合值与试验值比较
Fig.7 The comparison of the critical depth deterioration between the fit and test values

4 结 论

在季冻区道路边坡浅层滑移病害时有发生。探明其发生破坏的部位和破坏形态对于合理设计、确保安全十分必要。本文利用盐水的冰点低于普通水冰点的物理特性, 设计一组试验, 并得到边坡滑移形态和深度的试验结果。

(1) 采用同一种土体, 分别用 1% 浓度盐水以及普通水配制, 按体积比 2:3 制作试件, 在 -3°C 的温度下, 在两种材料界面处实现冻融界面。

(2) 采用相应装置进行土体下滑抗力试验, 试验结果表明, 季节冰冻区土质边坡发生滑动时, 下滑体为等厚度矩形体, 滑移面近似为一个平面。

(3) 随冻融循环次数增加, 临界深度变浅, 根据结果拟合出经冻融循环后符合本文土质条件的边坡滑动临界深度的损伤模型。

参考文献

- [1] 王根龙. 岩质边坡稳定塑性极限分析方法——斜分条法[J]. 岩土工程学报, 2007, 12: 1766—1770.
WANG Gen-long. Rock slope stability analysis based on plasticity limit theory——method of slices with inclined interfaces[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 12: 1766—1770.
- [2] 陈祖煜. 土力学经典问题的极限分析上、下限解[J]. 岩土工程学报, 2002, 1: 1—11.
CHEN Zu-yu. Limit analysis for the classic problems of soil mechanics[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 1: 1—11.
- [3] 刘红军, 王丕祥. 公路土质边坡冻融失稳稳定性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38: 764—766.
LIU Hong-jun, WANG Pi-xiang. Stability analysis of loss of stability caused by freeze and melt of earthen side slopes of highways[J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2006, 38: 764—766.
- [4] 廖红建. 考虑饱和-非饱和和渗流作用的土质边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008, 12: 3229—3304.
LIAO Hong-jian. Stability analysis of soil slopes considering saturated and unsaturated seepage effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 12: 3229—3304.
- [5] 陈波. 土质路堑边坡冻融滑塌机理及稳定性分析[J]. 黑龙江交通科技, 2008, 2: 65—66.
CHEN Bo. The analysis on freeze-thaw collapsing mechanism and stability of soil cutting slope[J]. **Communications Science and Technology Heilongjiang**, 2008, 2: 65—66.
- [6] 孙冠华, 郑宏, 李春光. 基于等效塑性应变的边坡滑面搜索[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1159—1163.
SUN Guan-hua, ZHENG Hong, LI Chun-guang. Searching critical slip surface of slopes based on equivalent plastic strain[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(5): 1159—1163.
- [7] 黄茂松, 贾苍琴. 考虑非饱和和非稳定渗流的土坡稳定分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 2: 202—206.
HUANG Mao-song, JIA Cang-qin. Stability analysis of soil slopes subjected to unsaturated transient seepage[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 2: 202—206.
- [8] 沈宇鹏. 青藏铁路安多段多年冻土斜坡路基稳定性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [9] 魏先祥, 赖远明. 相似方法的原理及应用[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2001, 1—38.
- [10] CHENG Yong-chun, GE Qi, HE Yan. Experimental research on the shear strength deterioration between the freezing and thawing surface of melting soil slope in seasonal frozen regions[C]//The 9th Intentional Conference of Chinese Transportation Professionals, 2009, Harbin Institute of Technology, Harbin.
- [11] 单炜, 刘红军, 杨林, 等. 季冻区土质路堑边坡浅层含水率变化研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(supp): 335—340.
SHAN Wei, LIU Hong-jun, YANG Lin, et al. Study of regularity of variation of water content in shallow layer of soil road cutting slopes in seasonally frozen-ground region[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(supp): 335—340.

上接第 1012 页

参考文献

- [1] HAN L, DAYAKAR P. Experiment investigation on principle stress rotation in Kaolin clay[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, 2005, 131(5): 633—642.
- [2] GUTIERREZ M, ISHIHARA K, TOWHATA I. Flow theory for sand during rotation of principal stress direction[J]. **Soil and Foundations**, 1991, 31(4): 121—132.
- [3] GUTIERREZ M, ISHIHARA K, TOWHATA I. Model for the deformation of sand during rotation of principal stress direction[J]. **Soil and Foundations**, 1993, 33(3): 105—117.
- [4] 李广信, 张其光, 黄永男. 等应力比平面应变试验中主应力转换的研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1868—1872.
LI Guang-xin, ZHANG Qi-guang, HUANG Yong-nan. Study on transforming of principal stresses in constant stress ratio plane strain tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(11): 1868—1872.
- [5] 沈扬, 周建, 龚晓南. 主应力轴旋转对土体性状影响的试验进展研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1408—1416.
SHEN Yang, ZHOU Jian, GONG Xiao-nan. Experimental progress research on influence of principal stress rotation on soils' characteristics[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(7): 1408—1416.
- [6] 张启辉, 赵锡宏. 主应力轴旋转对剪切带形成的影响分析[J]. 岩土力学, 2003, 21(1): 32—35.
ZHANG Qi-hui, ZHAOXi-hon. An influence on shear band formation of the rotations of principal stress directions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 21(1): 32—35.
- [7] COLE E R L. The behavior of solids in the simple shear apparatus[D]. Cambridge: Cambridge University, 1967.
- [8] ROWE P W. The relation between the shear strength of sands in triaxial compression, plane strain and direct shear[J]. **Geotechnique**, 1969, 19(1): 75—86.
- [9] ODA M, KONISHI J. Microscopic deformation mechanism of granular material in simple shear[J]. **Soils and Foundations**, 1974, 14(4): 25—53.
- [10] MOROTO N. On deformation of granular material in simple shear[J]. **Soils and Foundations**, 1987, 27(1): 77—85.
- [11] MOROTO N. strength of granular material in simple shear[J]. **Soils and Foundations**, 1988, 28(2): 85—94.