

## 季节性冰冻地区公路边坡侵蚀破坏模式

韩继国<sup>1,2</sup>, 王选仓<sup>1</sup>, 时成林<sup>2</sup>, 王达亮<sup>2</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 吉林省交通科学研究所, 吉林 长春 130012)

**摘要:**针对季节性冰冻地区的路基边坡冻融滑坍破坏现象, 分析了公路边坡破坏的各种侵蚀模式和影响因素。采用坡面流拖曳力法、坡面流量法等对坡面水力学特征进行研究, 测算坡面冲刷临界坡度值, 分析临界坡度与冲刷量之间的关系; 同时采用有效应力法研究了冻融作用下的边坡安全稳定性。结果表明: 季节性冰冻地区粘性土最大冲刷强度对应的临界坡度与目前常用的坡度值很接近或交叉, 为减少水土流失, 建议放缓土质边坡; 边坡土体冻结前含水质量分数和融化后抗剪强度下降幅度是影响冻融滑坍破坏的主要因素, 建议在设计中要考虑冲刷和冻融因素, 并对特殊土质边坡进行相应的物理力学指标检测和稳定性验算。

**关键词:** 道路工程; 冰冻地区; 公路边坡; 侵蚀破坏; 临界坡角; 冻融

**中图分类号:** U416.1 **文献标志码:** A

## Erosion collapse mode of highway slope in seasonal frost area

HAN Ji-guo<sup>1,2</sup>, WANG Xuan-cang<sup>1</sup>, SHI Cheng-lin<sup>2</sup>, WANG Da-liang<sup>2</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Jilin Province Research Institute of Communications Science, Changchun 130012, Jilin, China)

**Abstract:** The present state of highway slope collapse in north-east of China is serious in early spring due to repeating freezing-thawing effect. The different modes and influencing factors of the collapse are analyzed, the hydro mechanical characteristic of slope is studied with slope drag force method and slope flow method, the critical gradient for erosion of the slope is measured, the relation of critical gradient with erosion is presented, the safety and stability of slope after freezing-thawing is checked by effective stress method. The results show that the critical gradient value of clay in north-east of China is near or cross over the safe value common used in highway at present, so the gradient of soil slope should be decreased to reduce soil-water loss; the main factors influencing freezing-thawing collapse are water content in soil slope before freezing, the scope of shear strength should be declined after thawing. In practical project design, the influencing factors include wash-off and freeze-thaw destroy should be considered, and the test of physical mechanical indexes and the stabilization checking should be carried out. 3 figs, 9 refs.

**Key words:** road engineering; frost area; slope; erosion collapse; critical gradient; freezing-thawing

收稿日期: 2007-02-15

基金项目: 交通部“九五”行业联合攻关项目(95-05-02-07)

作者简介: 韩继国(1965-), 男, 吉林长春人, 吉林省交通科学研究所高级工程师, 长安大学博士研究生, E-mail: hjguo8868@126.com。



## 0 引言

近年来,随着中国东北通向山岭地区高等级公路的不断延伸,公路边坡滑坍、冲刷和滑坡等路基病害频频发生。这一方面危及行车安全和路基路面的稳定性;另一方面也造成环境污染、水土流失。因此,公路边坡的侵蚀破坏应该引起足够的重视。

中国很多学者针对路基坡面破坏形式和稳定性开展了研究,一般多是从降雨(水)对坡面的冲刷破坏着手,制定了相应的防护措施。杨航宇等编著的《公路边坡防护与治理》<sup>[1]</sup>结合京珠(北京—珠海)高速公路粤境内山区段的公路边坡工程实践,对公路边坡水冲刷采取了防护措施;长安大学的王秉纲教授、王选仓教授等主要从黄土地区地质类型出发,对边坡水冲刷及稳定性问题进行了深入地研究<sup>[2]</sup>。通过资料查阅和分析,中国目前对公路边坡稳定性的研究大多集中在水冲刷路基稳定性方面,而对冻融侵蚀引起的破坏和防护尚无深入地研究<sup>[3-6]</sup>。为此,本文针对季节性冰冻地区的路基边坡冻融滑坍破坏进行研究。

## 1 路基边坡侵蚀破坏类型及影响因素

### 1.1 土壤侵蚀破坏类型

#### 1.1.1 冻融侵蚀

冻融侵蚀是由于冻结和融化的循环作用,使土体或岩石发生机械性破坏的现象。冻融作用破坏了土壤内部的凝聚力,降低了土壤的抗剪强度,易使坡面表层土体发生滑移。这一过程大致可分为“冻融作用引起坡面土质顺坡下移”和“冻融作用引起坡面防护工程滑坍破坏”。

(1) 冻融作用引起坡面土质顺坡下移。伴随着冻胀、融化的过程,土颗粒(或岩屑颗粒)的体积由膨胀变成收缩状态。膨胀时颗粒垂直于斜坡方向上抬;收缩下落时却是沿重力方向直落而下。每次胀缩都使土粒或岩屑从斜坡上原来位置向下移动一小段距离。经过多次冻融循环,坡上土颗粒将不断顺坡向下移动,最终导致坡脚土体堆积、坡面变缓。这种现象在坡面植被覆盖率达到一定程度时可得到缓解。

(2) 冻融作用引起坡面防护工程滑坍破坏。由于坡面土体冻融具有时间和空间的不一致性,当坡面上层土体解冻,而下层土体未解冻时会形成一个不透水层,水分沿交界面渗流,使两层之间的摩擦阻力减小,土体抗剪强度下降。当坡面圬工防护松散、边坡较陡时(超过土体休止角时),就会发生边坡滑

坍破坏。

#### 1.1.2 水力侵蚀

水力侵蚀是指在雨滴击溅、地表径流冲刷和下渗水分作用下,土壤、土壤母质及其他地面组成物质被破坏、剥蚀、搬运和沉积的全过程。水力侵蚀是目前世界上分布最广、危害也最为普遍的一种土壤侵蚀类型。中国东北地区由于不断的冻融作用,使公路边坡岩土出现“蓬松”现象,且恶劣的气候条件不利于植物生长,因此使“强而集中的降雨”的破坏作用加大。常见的公路边坡水力侵蚀形式主要有雨滴击溅侵蚀、层状面蚀、砂砾化面蚀、鳞片状面蚀、细沟状面蚀、沟蚀、边坡滑坍、山洪侵蚀和库岸波浪侵蚀等。

#### 1.1.3 重力侵蚀

重力侵蚀是一种以重力作用为主引起的土壤侵蚀形式。坡面表层土石物质及中浅层基岩由于本身所受的重力作用失去平衡而发生位移和堆积。重力侵蚀的发生多与其他外力参与有密切关系,特别是在水力侵蚀及下渗水的共同作用下,以重力为直接原因所导致的地表物质移动。这种侵蚀常常是突然发生的,因而给公路工程和社会带来巨大危害。

#### 1.1.4 风力侵蚀

风力侵蚀是指土壤颗粒或砂粒在风力冲击作用下移动和堆积的整个过程。这种破坏形式在中国东北地区西部平原风沙地带(吉林省和黑龙江省西部)较为普遍。

### 1.2 路基边坡侵蚀破坏的影响因素

公路是暴露于自然界中的构筑物,引起季节性冰冻地区公路边坡侵蚀损坏的因素十分复杂。中国东北地区公路边坡侵蚀破坏的影响因素主要有:土体的类型;土的含水质量分数;土体压实度;边坡植被覆盖率;边坡的几何性状;降雨、融雪情况。

## 2 边坡水力侵蚀计算分析

不论是在冻融季节交替的北方,还是在温暖的南方,公路边坡的侵蚀损坏大都与“水”密切相关,因而“治坡”应先“治水”。确定“治水”目标,针对边坡水力侵蚀损坏机理进行计算分析,掌握边坡发生冲刷的条件及冲刷临界坡度就显得十分重要<sup>[7]</sup>。

### 2.1 坡面冲刷的临界坡度

由“边坡水力学特性”分析可知,边坡径流极限流速( $V_{\max}$ )对应一个临界坡角( $\theta_{\text{临}}$ )。同时,边坡土壤侵蚀量也是流量与流速的函数,因此,也应该存在一个坡面冲刷侵蚀量的临界坡角。坡面冲刷强度最大时,边坡坡度称为坡面冲刷临界坡度( $\theta_{\text{临}}$ )。冲刷强



度就是坡面流的挟砂能力或坡面的输砂量,包括推移质(土中颗粒较大部分)和悬移质(土中较小颗粒部分)两部分。

## 2.2 计算分析法

本文采取3种不同的方法,对中国东北地区粘土质边坡水力冲刷临界坡角进行计算分析。

### 2.2.1 坡面流拖曳力法

从坡面流拖曳力入手,假设坡面流为平衡流、均匀流,那么径流对表层的冲刷力为

$$\tau_0 = \gamma_w h J = \gamma_w h \sin \theta \quad (1)$$

式中: $\tau_0$ 为径流对表层冲刷力; $\gamma_w$ 为水的容重; $h$ 为水层厚度; $J$ 为渗流水力坡度; $\theta$ 为路堑坡度。

同时,由于坡面倾斜,受雨面积减少。当地面水平时,受雨面积为 $A$ ,设此时产生的水层厚度为 $h_0$ ,受雨面积缩小为 $A' = A \cos \theta$ ,坡面上的水层厚度 $h$ 与相同面积水平上的水层厚度 $h_0$ 的关系为

$$h = h_0 \cos \theta \quad (2)$$

代入式(1),得

$$\tau_0 = \gamma_w h_0 \cos \theta \sin \theta$$

坡面土物颗粒沿坡面向下运动的合力 $\tau$ 为水流拖曳力与颗粒水下重力沿坡面分量之和

$$\tau = \gamma_w h_0 \cos \theta \sin \theta + (\gamma_s - \gamma_w)(\pi D^3/6) \sin \theta \quad (3)$$

式中: $\gamma_s$ 为土颗粒容重; $D$ 为土颗粒粒径。

经求导计算,令 $\frac{d\tau}{d\theta} = 0$ ,得到 $1 - 2\sin^2 \theta = 0$ ,所以

$\theta = 45^\circ$ 。也就是说,由此分析得到坡面冲刷临界坡度值为 $45^\circ$ 。从 $\tau_0$ 的表达式中还可以看出,临界坡度与坡面流深度、坡度、土颗粒特性有关。

### 2.2.2 坡面流量法

运用能量法,从坡面能量入手,由动能原理得

$$E = mv^2/2 \quad (4)$$

对 $m$ ,则有

$$m = \gamma_w q = \gamma_w h v \quad (5)$$

式中: $E$ 为水体动能; $m$ 为水体质量; $v$ 为水流平均流速; $q$ 为单宽流量。

对于 $v$ ,采用曼宁公式

$$v = \frac{1}{n} h^{\frac{2}{3}} (\sin \theta)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中: $n$ 为粗糙系数。

考虑坡度增加,受雨面积减小,则有

$$h = h_0 \cos \theta \quad (7)$$

则可得 $E$ 为

$$E = \frac{\gamma_w h_0}{2n^3} (\sin \theta)^{\frac{3}{2}} (\cos \theta)^3 \quad (8)$$

当 $h_0$ 一定时,令

$$\frac{d}{d\theta} \left( \frac{2n^3}{\gamma_w h_0} E \right) = 0 \quad (9)$$

解得 $\theta \approx 35^\circ 15'$ ,即坡面冲刷临界坡度约为 $35^\circ$ 。

### 2.2.3 坡面流挟砂力法

从坡面流挟砂力入手,坡面流的总挟砂力

$$g_t = \tau_0 U \left( \frac{K_{eb}}{\tan \alpha} + 0.01 \frac{U}{\omega} \right) \quad (10)$$

式中: $g_t$ 为坡面流总挟砂力; $U$ 为坡面流断面流量; $\omega$ 为颗粒在水流中的沉速; $K_{eb}$ 为水流搬运推移质的效率; $\alpha$ 为边坡坡度值。

根据实际情况对有关参数进行取值,给定误差目标值,对 $g_t$ 求最大值。用曼宁公式时,临界坡度 $\theta$ 约为 $43^\circ$ ;用对数流速公式时为 $41^\circ \sim 43^\circ$ 。用此法得到临界坡度为 $41^\circ \sim 43^\circ$ 。

### 2.2.4 计算分析

(1)从以上3种理论计算方法可知,对于土质边坡坡面,其他条件一致时,最大冲刷强度的临界坡度有一定范围( $35^\circ \sim 43^\circ$ ,即 $1:1.43 \sim 1:1.07$ );而目前的静力稳定性设计方法得到的安全坡度( $33^\circ \sim 45^\circ$ ,即 $1:1.54 \sim 1:1$ )与冲刷临界坡度接近或存在交叉,如果施工控制不好,易使坡率处于危险状态,这也是目前公路边坡冲刷问题严重的一个原因。因此,必须对坡面采取有效的防护措施,以减少冲刷造成的损失。

(2)影响冲刷临界坡角的因素较多,有坡面土颗粒的粒径、土壤粘聚力、内摩擦角和水入渗率等,因此,在确定影响因素时应综合考虑分析。

## 3 边坡冻融侵蚀破坏的计算和分析

### 3.1 边坡顺坡滑坍破坏形式及原因分析

在吉林省的春融季节,观察新建公路边坡时,常常会发现坡面发生顺坡土体的滑坍破坏(也称为边坡溜方),这是冰冻地区特有的边坡损坏形式。

冻融滑坍破坏的原因<sup>[8]</sup>:在春融初期,边坡上覆盖的积雪不断融化、下渗,开挖边坡上方自然地表的积雪融化也增加了水源的补给,致使边坡表层土体水分来不及蒸发,呈潮湿、保水的状态。又由于此时边坡土体下部还处于冻结状态,融化的土体与冻结的土体之间有一个层面(冰面),水分无法继续下渗;当上层土体的粘聚力及内摩擦力不断减少,达到一定程度时,坡面又处于临界坡度时,上层融化了的土体就会沿着冻结土层的表面向下滑动,产生边坡顺层滑坍破坏,这时的滑动面一般呈直线状(图1)。

随着气温的不断升高,第一层融化的土体滑下



后,其下冻结的土体仍会不断融化,当融化的深度达到一定时,又会发生与第一次相同的滑坍破坏(图2),直至边坡稳定为止。

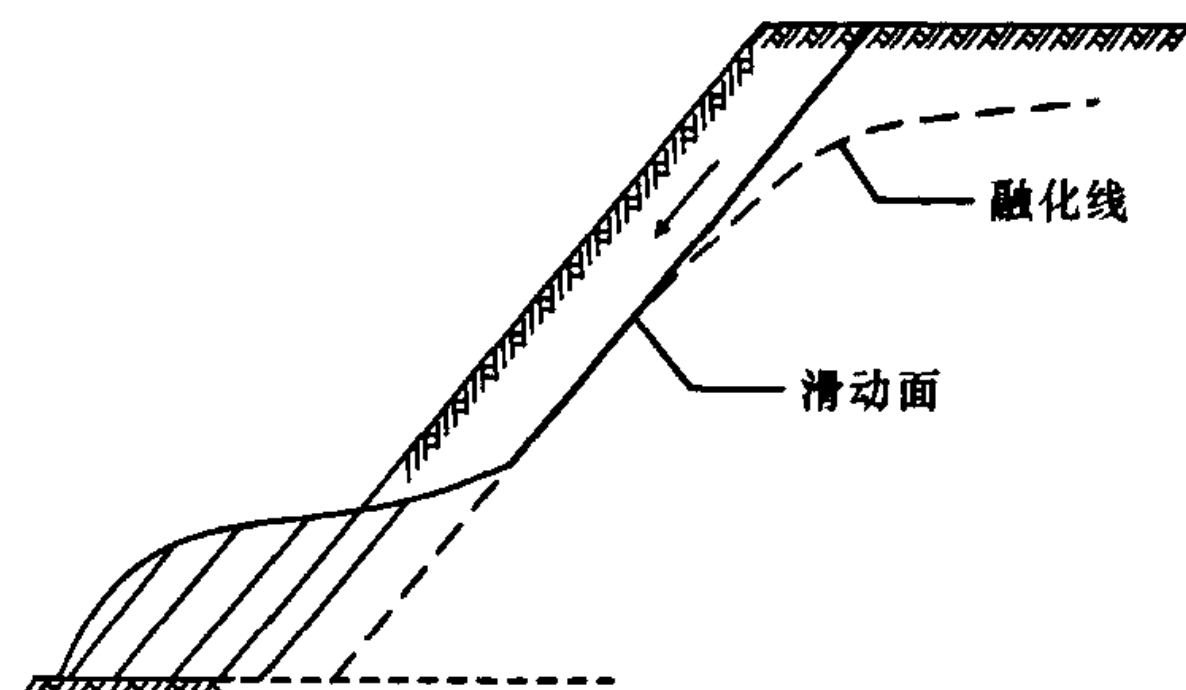


图1 春融初期边坡冻融滑坍破坏形式

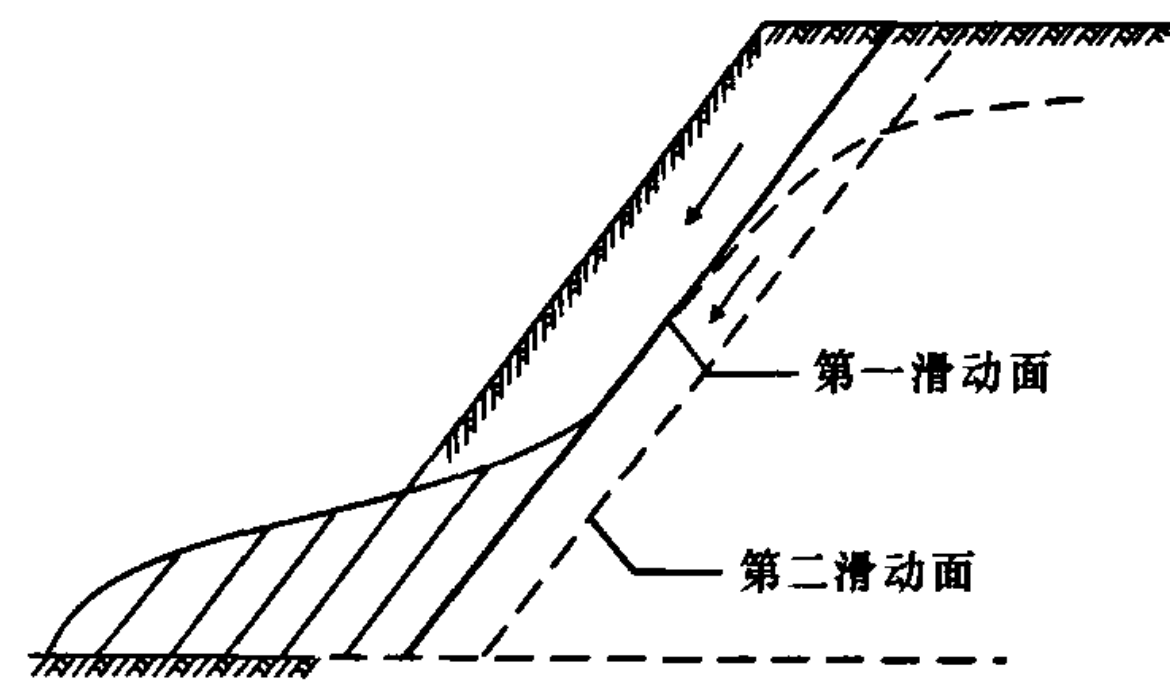


图2 边坡冻融滑坍进一步破坏形式

### 3.2 边坡冻融滑坍破坏的力学稳定性

#### 3.2.1 受力模型的假定及计算公式

通过对边坡冻融顺层滑坍破坏形式的分析可知,滑动面以下仍为冻结土体,以上为已融化土层。为进行边坡滑坍破坏的稳定性分析计算,简化的受力分析(图3)及假定为:

路堑边坡冻融滑坍破坏时的滑动面平行于边坡坡面,近似为直线面,水渗流方向也平行于坡面;路堑边坡冻融滑坍破坏时上层土体为水饱和状态,滑动面以下仍为冻结状态,滑动面相对隔水;由于滑动土体厚度与坡长相比相对较小,因此不考虑坡长和坡端阻力对滑塌体的受力影响,作用于单元土柱垂直面上的水平力是相等的,且方向相反,滑动面上每一点的应力状态均相同。

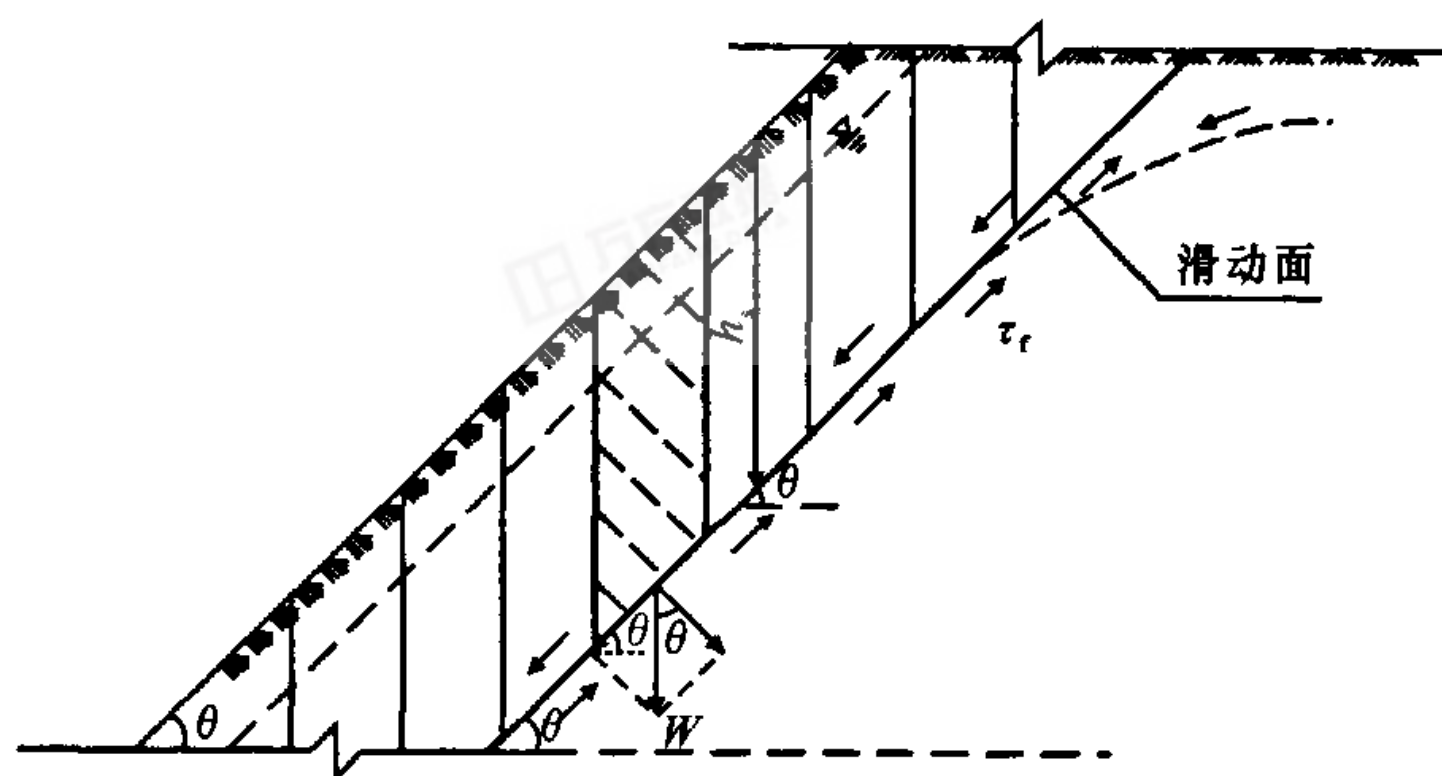


图3 边坡冻融滑坍破坏受力分析

根据以上的假定和图3受力分析,此时边坡稳定性验算可表示为

$$K = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (11)$$

由于假定滑动土体为饱和状态,土体内存在孔隙水,将产生孔隙水压力,使土的有效应力减少,因此冻融状态增加了边坡的破坏危险。采用有效应力法进行稳定性验算,此时土的抗剪强度可表示为

$$\tau_f = c' + (\delta - \mu) \tan \varphi' \quad (12)$$

其中,  $\delta = \gamma_{\text{sat}} h_s \cos^2 \theta$ ,  $\mu = \gamma_w h_s \cos^2 \theta$ 。

边坡滑动面上产生的剪应力为

$$\tau = \gamma_{\text{sat}} h_s \sin \theta \cos \theta \quad (13)$$

将式(12)、式(13)代入式(11),经整理后得

$$K = \frac{[(\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) h_s \cos \theta \tan \varphi' + c' \sec \theta]}{(\gamma_{\text{sat}} h_s \sin \theta)} \quad (14)$$

式中:  $K$  为边坡稳定安全系数;  $\tau_f$  为滑动面上土的抗剪强度 ( $\text{kN/m}^2$ );  $\tau$  为滑动面上产生的剪应力 ( $\text{kN/m}^2$ );  $W$  为土体单元重;  $c'$  为以有效应力表示的土粘聚力 ( $\text{kN/m}^2$ );  $\varphi'$  为有效应力表示的土内摩擦角;  $\delta$  为总应力 ( $\text{kN/m}^2$ );  $\mu$  为孔隙水压力 ( $\text{kN/m}^2$ );  $\gamma_{\text{sat}}$  为滑体土的饱和容重 ( $\text{kN/m}^3$ );  $\gamma_w$  为水的容重 ( $\text{kN/m}^3$ );  $h_s$  为滑动土体的厚度 (m);  $\theta$  为边坡的坡度 ( $^\circ$ )。

#### 3.2.2 边坡冻融滑坍破坏临界坡度影响因素计算

目前,文献资料只较多地介绍土体天然状态下的物理力学指标,尚未见冻融前后土体力学指标变化的系统性试验结果。本文结合以往工程试验资料,并参考有关文献<sup>[9]</sup>,以吉林长春地区为例,进行计算分析。

(1) 计算示例。吉林长春地区某高等级公路,路堑边坡为黄褐色粘性土,春融季节边坡土体融化深度为 0.8 m,融化土层呈水饱和状态,计算此边坡发生冻融滑坍的临界坡度。根据经验,长春地区粘性土空隙比一般为 0.7 ~ 0.9,饱和粘土容重  $\gamma_{\text{sat}} = 18.8 \text{ kN/m}^3$ ,此时土体的极限强度参数  $c' = 6.4 \text{ kN/m}^2$ ,  $\varphi' = 16^\circ$ ,根据式(11) ~ 式(14) 计算。

$$\text{令 } K = \frac{[(\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) h_s \cos \theta \tan \varphi' + c' \sec \theta]}{(\gamma_{\text{sat}} h_s \sin \theta)} = 1$$

代入已知参数,解得:  $\theta_1 = 43^\circ 01' 46''$ ;  $\theta_2 = 54^\circ 47' 45''$ 。

临界滑坍坡度应取较小值,即长春地区粘性土路堑边坡冻融滑坍破坏的临界坡度约为  $43^\circ$ 。

(2) 影响因素分析。以上示例是在假定季节性冰冻地区条件下进行计算的,实际上,季节性冰冻地区公路边坡冻融滑坍破坏的影响因素很复杂。每年的秋季、冬季和春季,要经历多次冻结、融化、再冻结、再融化的过程,其间还要发生轻重不同的冻胀现象。边坡土质物理力学性质的不同,外界条件(水源



补给情况、边坡长短等)的不同,均会影响冻融滑坍破坏的临界坡度。总体来说,土体冻结前的含水质量分数和融化后的边坡土质抗剪强度下降幅度是影响冰融滑坍破坏临界坡度值的内因;春季融化时边坡土体的防护状况、类型、水分补给来源和边坡断面形式是影响冻融滑坍破坏临界坡度值的外因。在实际工程中,应针对特定的边坡土质进行取样试验,确定物理力学参数,并完善边坡排水设施,减少冻胀、冻融对边坡的破坏作用。

## 4 结 语

(1)当边坡接近冲刷临界坡度时最易发生水力冲刷损坏,当坡度小于或大于临界坡度时边坡反而呈现冲刷量减少、稳定的状态,这也是某些直立性较好的土质边坡(如黄粘土)可以放缓边坡的缘故;另一方面,过陡的边坡对植物防护的品种要求很严格,因此除非周边条件所限,在季节性冰冻地区一般不宜采用陡边坡形式。

(2)通过初步的分析计算可知,对于特定的土体,冻融滑坍临界坡度与水力冲刷临界坡度相近,但破坏形式不同,当坡度接近或大于临界坡度时均易发生滑坍破坏,这是由边坡土体力学稳定性所决定的( $K$ 值随 $\theta$ 角的增大而减少)。

(3)通过边坡冻融滑坍破坏的理论分析和计算,发现边坡土体冻结前含水质量分数和融化后抗剪强度下降幅度是影响冻融滑坍破坏的主要因素;在实际工程设计中,应对特殊边坡进行土质的物理力学指标检测,并进行相应的力学稳定性验算。

(4)在季节性冰冻地区公路边坡防护的设计和施工中,要考虑冲刷和冻融破坏两方面的影响因素,对于不同岩土性质的挖方边坡(尤其是较大较长的边坡),不能采用统一的边坡坡度,应先进行稳定性验算,再确定边坡形式。对临界坡度较小的边坡,从工程经济的角度考虑,采用较高级的防护措施(如框格植草防护、厚层基材喷附等);对临界坡度较大的边坡,可以采用较为经济的植物防护。

### 参考文献:

### References:

- [1] 杨航宇,颜志平,朱赞凌,等.公路边坡防护与治理[M].北京:人民交通出版社,2002.
- [2] 王秉纲,王选仓,罗 斌.路基边坡防护设计与施工技术规范研究[R].西安:长安大学,2002.
- [3] 徐世强,折学森,刘怡琳,等.公路黄土坝式路堤稳定性计算方法[J].交通运输工程学报,2006,6(3):42-46.  
XU Shi-qiang, SHE Xue-sen, LIU Yi-lin, et al. Stability computation method of highway loess dam-like embankment [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006,6(3):42-46.
- [4] 汪益敏,王秉纲.公路土质路基边坡坡面冲刷稳定性的模糊综合评价[J].中国公路学报,2005,18(1):24-29.  
WANG Yi-min, WANG Bing-gang. Fuzzy evaluation method of scouring stability on soil subgrade slope [J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1):24-29.
- [5] 李家春,田伟平.黄土路基坡顶及路肩暴雨冲蚀破坏机理试验[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(2):27-29.  
LI Jia-chun, TIAN Wei-ping. Rainfall erode mechanism on loess road shoulder and tope of side-slope[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004,24(2):27-29.
- [6] 汪益敏.路基边坡坡面冲刷特性与加固材料性能研究[J].岩土力学与工程学报,2004,23(4):70-73.  
WANG Yi-min. Study on rainwash properties and effects of reinforcement materials for highway subgrade slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(4):70-73.
- [7] 李志刚,刘建民.高等级公路路堤边坡冲刷防护临界高度野外模拟试验研究[J].公路,2003,(10):43-46.  
LI Zhi-gang, LIU Jian-min. Field simulating test and research on critical height of erosion protection for expressway embankment slopes[J]. Highway, 2003, (10):43-46.
- [8] Gray D H, Sotir R B. Biotechnical stabilization of highway out slope [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992,118(9):1 395-1 409.
- [9] 王文生,杨晓华,谢永利.公路边坡植物护坡机理[J].长安大学学报:自然科学版,2005,25(4):26-30.  
WANG Wen-sheng, YANG Xiao-hua, XIE Yong-li. Mechanism of biotechnical protection for highway slope[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005,25(4):26-30.