

文章编号: 1005-0523(2015)05-0019-08

## 基于温度-应力耦合效应的冻土高边坡稳定特性分析

许颖, 丁春林, 吴科亮, 赵灵吟

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘要:**以京新高速某季节性冻土高边坡为背景,通过考虑伴有相变的瞬态温度场与应力场耦合,运用有限元分析软件 ANSYS,分别模拟研究了含水率、温度、坡率、有无护坡等因素对边坡位移场、应力场和温度场的影响,并通过比较边坡安全系数的大小,判断各因素对边坡稳定性的影响。计算结果表明:边坡稳定性与含水率、坡率、边坡高度呈负相关,即数值越大稳定性越低;而温度作为影响季冻区边坡稳定的重要外部条件,当负温值位于 $-10^{\circ}\text{C}$ 以上时,各个指标对其敏感度较高,随着温度的进一步降低,各指标对温度的灵敏度逐渐减小;此外,施作护坡可有效地减小边坡的最大位移和冻结深度,增强其稳定性。

**关键词:**冻土高边坡;稳定;温度-应力耦合场;数值分析;影响因素

中图分类号:U213A

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2015.05.005

我国是世界上第三大冻土国,多年冻土和季节性冻土面积分别约占国土面积的 21.5%和 53.5%,但是在目前全球气候变暖、海平面上升的严峻形势下,冻土面积不断退化,而由于冻土融化导致的冻土地区边坡塌陷、滑坡也时有发生。特别是对于季节性冻土区的高边坡工程,其边坡表面温度随大气温度发生周期性的变化,其表层土体也随之发生季节性的冻结和融化,导致各种冻融破坏现象的发生,例如路堑边坡土体的失稳滑移和支护结构的冻胀破坏等,造成了重大的安全事故和经济损失。因此,对季冻区高边坡的稳定性进行研究具有重要的现实意义。

目前,已有不少学者对季冻区冻土的稳定性问题开展了研究。周幼吾<sup>[1]</sup>等对冻土区边坡失稳类型进行划分与描述。勒德武等<sup>[2]</sup>对青藏路及青藏铁路的 3 段边坡进行了观测,并分析了滑体变形的影响因素。孙意<sup>[3]</sup>以青藏铁路五道梁五北大桥碎石护坡、片石护道实验段为依托,在地温场实测数据的基础上结合实测路基变形,评价不同结构尺寸的碎石护坡和片石护道的支护效果及路堤边坡的稳定性。宋高嵩等<sup>[4]</sup>从岩土的水理性出发研究了季节性冰冻区公路路基边坡溜方的稳定性影响。牛富俊等<sup>[5]</sup>通过对青藏高原多年冻土区平缓斜坡上两处热融滑塌的变形监测,研究了热融滑塌发育的斜坡地质、冻土条件和变形特征。谷宪民<sup>[6]</sup>采用现场试验和室内试验相结合的方法,研究了季节冻土的冻融与土质、密度、含水量等性质的关系。英国的 C. Harris<sup>[7]</sup>博士利用离心模型实验系统地开展了冻土边坡模型试验研究工作,分析得到:冰冻-融化过程中斜坡土体位移变化规律与融化层深度、时间、冻融循环次数有关,并且边坡滑动的形式主要取决于土体内部水分的分布情况。彭丽云<sup>[8]</sup>选取了京包、包兰线上冻害频发地段的粉质粘土,采用冻胀试验装置,进行了开放系统的冻胀试验,分析了土样在不同冻结温度时冻胀的整个过程,实验结果表明:随着环境温度的降低,土样的冻结深度相应增加。赵坚<sup>[9]</sup>通过考虑季节性冻融循环作用的影响,并结合现场观测数据,运用极限平衡法,研究了季冻区边坡浅层土体的稳定性,并给出了防护建议。Wei<sup>[10]</sup>等人通过将现场测试和室内测试相结合,研究了春季融化期边坡稳定性与温度、降水、边坡表面的植物品种等因素的关系。张世民等<sup>[11]</sup>通过考虑水分场与温度

收稿日期:2015-08-25

作者简介:许颖(1991—),女,硕士研究生,主要研究方向为地下工程、岩土工程等。

通讯作者:丁春林(1968—),男,副教授,博士,研究方向为地下工程、岩土工程等。

场的两场耦合及温度对冻土路基力学特征的影响,系统研究了多年冻土区路基的热-力稳定性问题,并较好地预测了青藏铁路多年冻土路基的长期稳定性。这些研究从理论和试验相结合的角度,对冻土稳定性的影响因素进行了研究,但是针对高边坡工程的研究还很少见。

季节性冻土区边坡稳定的影响因素相比一般边坡要复杂,主要影响因素可分为边坡形态、外部环境、土的性质 3 大类。通过考虑伴有相变的瞬态温度场,考虑温度场和应力场的两场耦合效应以及随季节变化的环境温度,运用 ANSYS 大型有限元分析软件,采取直接耦合法,分析了边坡土体含水率、外界环境温度、边坡坡度、有无护坡等因素对边坡位移场、应力场和温度场的影响,探讨了季节性冻土区高边坡稳定的主要影响因素,以便通过采取相应措施对其进行防护。

## 1 计算理论

### 1.1 冻土非稳态温度场的控制方程

根据傅立叶定律和能量守恒定律,伴有相变的非稳态导热问题的热量平衡控制方程为<sup>[12]</sup>

在正冻区  $G_f$  内

$$G_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial z}) + q_t \quad (1)$$

在融化区  $G_u$  内

$$G_u \frac{\partial T_u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_u \frac{\partial T_u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda_u \frac{\partial T_u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_u \frac{\partial T_u}{\partial z}) + q_t \quad (2)$$

式中:  $T_f, C_f, \lambda_f$  分别为冻结土温度,  $^{\circ}\text{C}$ , 热容量,  $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$  和导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $T_u, C_u, \lambda_u$  为融化土温度,  $^{\circ}\text{C}$ ; 热容量,  $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$  和导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;

初始条件:

$$T_u|_{t=0} = T_0 \quad (3)$$

固定边界上可能的三类边界条件为

$$\begin{cases} T(x, y, z, t)|_{x, y, z \in \Gamma} = g(x, y, z, t) \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial n}|_{x, y, z \in \Gamma} = -q(x, y, z, t) \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial n}|_{\Gamma} = -a(T_l - T_s) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $L$  为含水土体的相变潜热,  $\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1}$ ;  $a$  为对流换热系数;  $T_l$  为周围环境流体的温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_s$  为边界上的温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.2 应力场基本方程

对于平面应力问题,在求解区域内的基本方程和边界条件是<sup>[13]</sup>:

平衡方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + f_x = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + f_y = 0 \end{cases} \quad (5)$$

几何方程:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \\ \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{cases} \quad (6)$$

物理方程:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_y) \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \mu\sigma_x) \\ \gamma_{xy} = \frac{2(1+\mu)}{E}\tau_{xy} \end{cases} \quad (7)$$

位移边界条件:

$$\begin{cases} u_s = \bar{u} \\ v_s = \bar{v} \end{cases} \quad (8)$$

应力边界条件:

$$\begin{cases} l(\sigma_x)_s + m(\tau_{yx})_s = \bar{f}_x \\ m(\sigma_y)_s + l(\tau_{xy})_s = \bar{f}_y \end{cases} \quad (9)$$

## 2 冻土高边坡耦合模型建立

ANSYS有限元软件分析热力耦合问题包括直接耦合法和间接耦合法。间接耦合法首先进行热分析,然后将求得的节点温度作为体荷载施加在结构应力分析中,而直接耦合法则使用具有温度和位移自由度的耦合单元,同时得到热分析和结构应力分析的结果,直接耦合法可以考虑其他分析领域(电磁、流体等)对热和结构的影响,并且能考虑热与结构的双向耦合作用。由于此模型中,热与结构的耦合是双向的,热分析影响结构应力分析,同时结构变形又影响热分析,因此本文采用直接耦合法对非线性温度荷载条件下季冻区路堑高边坡的热力耦合问题进行分析。

### 2.1 计算模型几何尺寸

本文选取京新高速公路韩集段 K53+280 断面作为研究对象,根据其工程特点和条件建立有限元计算模型,其中路面宽度为 24 m,一级、二级和三级边坡初步设计坡度比分别为 1:1,1:1 和 1:1.5,三级边坡坡高分别为 6,6 和 2 m,坡顶宽度取为 50 m,下边界深度取为 30 m。计算模型范围内由上及下地层依次为粘土(1 m)、粉土(6 m)、泥质砂岩(37 m),模型几何尺寸如图 1 所示。

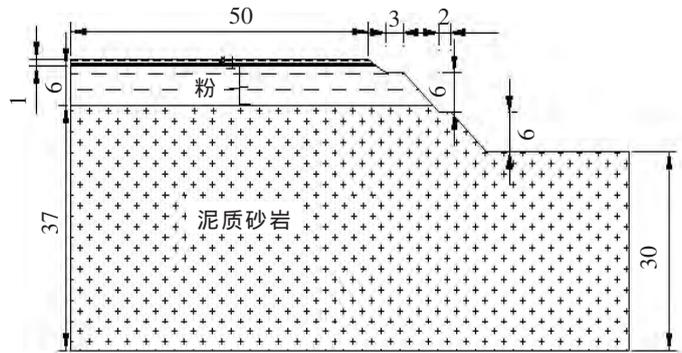


图 1 模型几何尺寸图(单位:m)

Fig. 1 The geometry figure of model (unit: m)

### 2.2 计算参数选取

本文所选的冻土热物理参数和力学参数是根据现场土样的室内试验结果所得,其中不同温度条件下的季冻区边坡热力耦合计算参数,如表 1 所示。

### 2.3 边界条件确定

根据近几十年集宁地区气候资料,采用回归分析法,将此冻土高边坡环境温度简化成如下三角函数形式<sup>[14]</sup>:

$$T_{\text{环境温度}} = T_0 + A \sin\left[\frac{2\pi}{365}t + B\right] \quad (10)$$

式中: $T_0$ 为边坡表面年平均地温,根据当地气温实测资料,取年平均温度为 1.7 °C; $A$ 为地表温度振幅,取为 30 °C; $B$ 为初始计算相位,取为  $\pi$ ,表示三角温度函数荷载从 4 月份开始作用; $t$ 为年周期内的运行时间。

坡顶、坡面和路基顶面受非线性温度荷载作用,采用如式 1 所示的温度条件;下边界温度根据集宁地区实测地温回归分析后,取 30 m 深的地温为 5 °C;边坡两侧取为绝热边界;位移边界条件为:下边界为竖向位移约束,两侧为水平位移约束,上表面为自由面。

表1 土体热物理和力学参数  
Tab.1 Thermal physical and mechanical parameters of soil

土名	温度/℃	导热系数 W/(m·℃)	比热容 KJ/(Kg·℃)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
粉土	24	1.44	1.20	8.15	0.361	12.2	23.3
	-5	1.50	1.02	39.03	0.279	527.3	45
	-10	1.68	1.02	54.47	0.273	698.2	48
	-15	2.19	1.02	95.00	0.253	592.1	55
粘土	24	0.89	1.29	6.01	0.379	14.0	5.4
	-5	1.10	1.15	26.70	0.297	782.2	7
	-10	1.52	1.15	44.13	0.273	1 476.1	7
	-15	1.82	1.15	57.57	0.263	1 529.7	18
泥质砂岩	24	1.23	1.41	10.21	0.352	4	25.5
	-5	1.40	1.21	20.37	0.298	786.8	32
	-10	1.74	1.21	33.70	0.279	2 738.6	5
	-15	1.81	1.21	60.07	0.252	1 396.4	33

### 3 季冻区边坡稳定因素模拟分析

本文依托的京新高速韩集段工程全长 42.0 km, 该区段属于典型的中温带季风气候, 冬季最低月平均气温由南至北由-10℃递减到-32℃; 夏季月平均气温在 16~27℃之间, 最高气温为 36~43℃。

为了研究季冻区边坡稳定性影响因素及其变化规律, 本文选取韩集段 K53+280 断面作为研究对象, 主要考虑土的性质、边坡形态中的高度和坡率、外界温度条件、以及有无护坡等因素对边坡稳定性的影响。

#### 3.1 土的性质对边坡稳定的影响

研究过程中主要考虑表层土含水率的影响, 模拟了 3 种含水率工况, 外部环境最低温度为-30℃, 考虑未施作护坡的情况, 其他各因素保持不变, 3 种工况下计算结果如表 2 所示。此外, 采用强度折减法, 选择初始折减系数为 1.0, 便可确定各工况的边坡安全系数。最后, 可整理得到不同工况下的最大受力、变形、冻土深度和安全系数, 如表 3 所示。

表2 3种工况下土层含水率  
Tab. 2 The moisture contents of soil under three conditions

土质	工况一	工况二	工况三
	含水率/%	含水率/%	含水率/%
粘土	24	30	35
粉土	12	12	12
泥质砂岩	18.1	18.1	18.1

表3 不同含水率工况下冻土边坡的计算结果  
Tab. 3 The calculation results of frozen soil slopes under different moisture contents

工况	最大剪应力/kPa	最大位移/mm	最大冻土厚度/m	安全系数
工况一	95.44	29.99	1.53	1.38
工况二	105.46	30.61	1.65	1.28
工况三	109.34	30.63	1.69	1.23

由上述图表分析可知, 随着表层土含水率的增加, 最大剪应力分别增大 10.5%, 3.7%, 工况二最大位移分别增大 2.1%, 0.001%, 最大冻结深度分别增大了 7.8%和 0.02%。可见, 最大剪应力、最大位移和最大冻土厚度都增大, 即各指标与含水率呈正相关; 但是可以看到, 工况二和工况三相比最大位移和最大冻土厚度变化都较小, 究其原因可能是工况二的含水率已经达到了一定的量, 冬季的冻胀深度已经足够大, 因而继续增

加水的含量对位移和冻结深度影响不大。但增大的这部分含水量对剪应力的影响依然不能忽视。在边坡工程中,边坡的稳定性可通过安全系数来比较,根据计算结果可知,含水率越大,边坡越不稳定,故在实际工程中应该注意采取排水措施对土层含水率进行控制。

### 3.2 外部环境温度对边坡稳定的影响

分析过程中主要考虑外界温度对边坡稳定性影响,其他因素保持不变,模型采用未加护坡时的情况,计算外部环境温度为-30,-20.5,-10.5,-5.5℃ 4 种环境工况。计算结果如表 4 所示,各种工况下的最大剪应力、最大位移、最大冻土厚度随温度的变化曲线如图 2~4 所示。

分析可知,最大剪应力、最大位移和最大冻结深度都与温度成负相关,温度越低,这 3 个指标的数值越大,即冻胀越严重,这与理论是相符合的。最大剪应力分别增大 80.1%,86.1%,45.6%,最大位移分别增大 125%,11.7%,17.9%,最大冻结深度分别增大 295%,50.6%,22.4%。可见,当负温不高于-10℃时,各个指标对外界温度的敏感度很高,数值发生很大变化;随着温度的进一步降低,各指标对温度的灵敏度逐渐减小。分析原因可能是,在一定温度范围内,随着温度的降低,土中水逐渐变为冰,且速度快,因此剪应力、位移、冻结深度增大速率快,当温度达到一定程度时,土中水已经全部冻结成冰,此时继续降低温度对 3 个指标的影响减弱;同时还可以看到,随着温度的增大,边坡安全系数增大,稳定性越好。综上分析可知,当温度处于负温时,温度的增加有利于边坡的稳定。因此,在工程实践中可以通过施作保温防护措施来保证边坡的稳定。

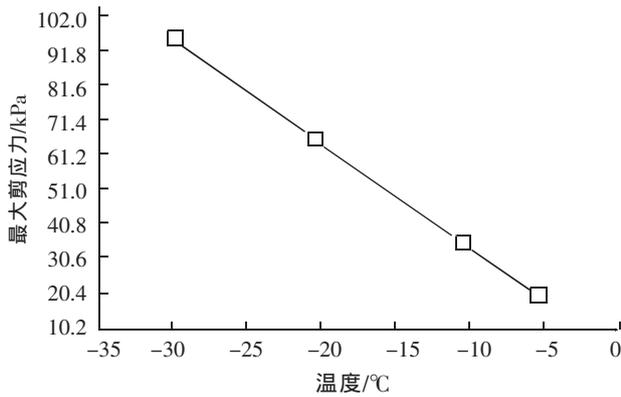


图 2 最大剪应力随温度的变化曲线图

Fig. 2 The curve of maximum shear stress under different temperature conditions

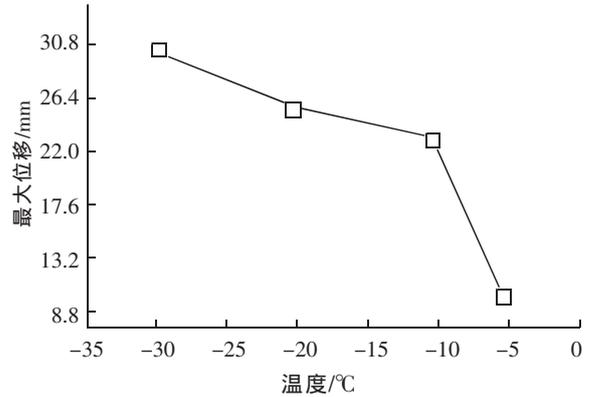


图 3 最大位移随温度的变化曲线

Fig. 3 The curve of maximum displacement under different temperature conditions

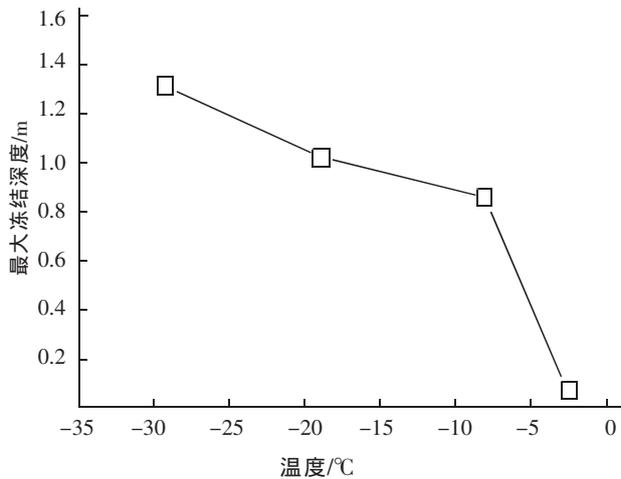


图 4 最大冻结深度随温度的变化曲线

Fig. 4 The curve of maximum frozen depth under different temperature conditions

表 4 不同温度条件下冻土边坡的计算指标值  
Table 4 The calculated parameter values of frozen soil slopes under different temperature

温度/℃	最大剪应力/kPa	最大位移/mm	最大冻结深度/m	安全系数
-5.5	19.56	10.1	0.21	2.00
-10.5	35.22	22.77	0.83	1.71
-20.5	65.55	25.43	1.25	1.52
-30	95.43	29.99	1.53	1.38

### 3.3 边坡形态对于边坡稳定的影响

限于文章篇幅,本文主要考虑边坡几何参数对于边坡稳定的影响,即坡高和坡率两个影响因素,计算模型未考虑施作护坡的情况。

#### 3.3.1 坡率对边坡稳定的影响

分析过程中考虑3种工况,工况一将第三级边坡的坡率设为1:1(变陡),工况二中一、二级和三级边坡的坡率分别为1:1,1:1和1:1.5,工况三将第一和第二级边坡的坡率设为1:1.5(变缓),其余条件保持不变。计算结果如表5所示。

分析可知,随着坡度的变缓,安全系数增大,最大剪应力分别减小1.3%和0.6%,最大冻结深度分别减小5.0%和2.6%。最大剪应力和最大冻结深度都随着坡率的减小呈单调递减,可见,坡度越缓和,边坡越稳定。因此,修筑边坡时坡率不应太大,选择比较适当缓和的坡率有利于边坡稳定。

#### 3.3.2 坡高对边坡稳定的影响

为了研究坡高对边坡稳定的影响,本文分析了以下3种工况,工况一:三级边坡的坡高分别为6,6和2 m,工况二:模拟一、二、三级边坡的高度分别变为5,5,4 m,并且保持各级边坡的坡率;工况三:将三级边坡变为两级边坡,高度均为7 m,两级边坡的坡率为1:1,其余各条件保持不变。计算所得的最大剪应力、最大位移、以及最大冻土厚度如表6所示。

分析可知,当第三级边坡高度增大、第一和第二级边坡高度减小时,最大位移、最大冻结深度以及最大剪应力分别增加了1.9%,11.8%和3.1%,且最大剪应力出现在第一级边坡的坡脚,即此处最危险。但是,跟工况二相比,工况三的最大位移和最大冻结深度不仅没有增大,有一个指标反而减小了,分析结果可能是由于各级边坡的坡率不同,且工况三只存在两级边坡,边坡数目减小了,相对增加了安全储备。从安全系数分析可知,随着边坡高度的增加,安全系数减小。原因是:边坡最大冻结深度增加了,因而在春融期由于冰的融化,将导致边坡土的抗剪能力小于最大剪应力,从而产生失稳破坏。由此可见,边坡的高度增加不利于边坡的抗冻稳定性。

### 3.4 有无护坡对于边坡稳定的影响

护坡设计的目的一般是防止边坡发生失稳破坏,同时具有防止雨水冲刷等作用,本工程中在各级边坡处分别设置地梁,地梁的截面为0.6 m×0.6 m,采用C25混凝土进行浇筑。通过数值模拟计算出施作护坡后的温度等值线、竖向位移等值线和剪应力等值线如图5~图7所示,表7为边坡前后冻土边坡的计算指标值。

表5 不同坡度工况下冻土边坡的计算指标值

Table 5 The calculated parameter values of frozen soil slopes under different slope rates

工况	最大剪应力/kPa	最大位移/mm	最大冻结深度/m	安全系数
工况一	96.70	30.36	1.61	1.34
工况二	95.43	29.99	1.53	1.38
工况三	94.84	30.32	1.49	1.41

表6 不同坡高工况下冻土边坡的计算指标值

Table 6 The calculated parameter values of frozen soil slopes under different slope heights

工况	最大剪应力/kPa	最大位移/mm	最大冻结深度/m	安全系数
工况一	95.43	29.99	1.53	1.38
工况二	98.38	30.35	1.71	1.37
工况三	104.34	30.35	1.70	1.37

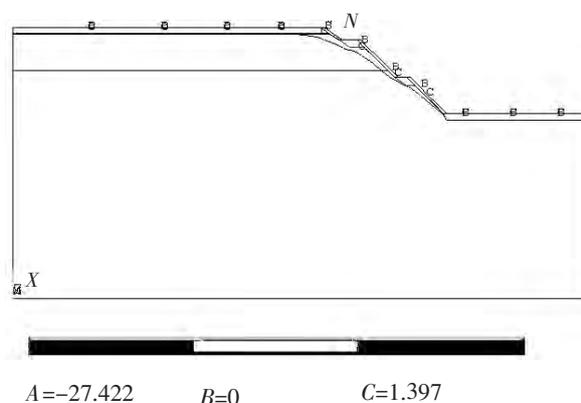


图5 设置护坡时温度分布等值线图

Fig. 5 The temperature contour with slope protection

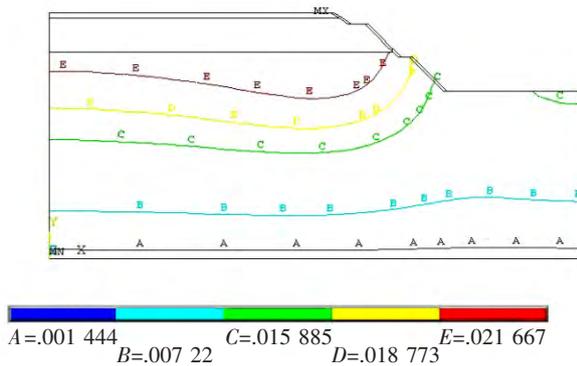


图 6 设置护坡时竖向位移分布等值线图

Fig. 6 The Y-direction displacement contour with slope protection

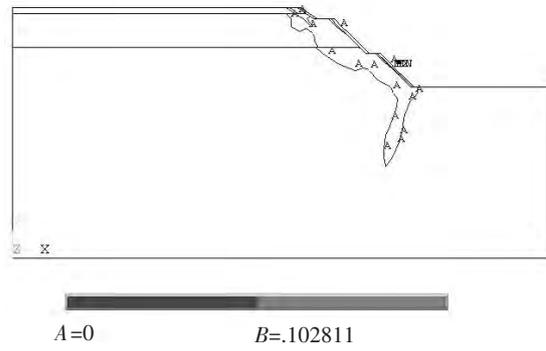


图 7 设置护坡时剪应力分布等值线图

Fig. 7 The shear stress contour with slope protection

表 7 设置护坡前后冻土边坡的计算指标值

Tab.7 The calculated parameter values of frozen soil slopes before and after the building of slope protection

工况	最大剪应力/kPa	最大位移/mm	最大冻结深度/m	安全系数
无护坡	95.43	29.99	1.53	1.38
有护坡	102.88	28.27	1.42	1.51

由上述图表分析可知:边坡最大剪应力为 102.88 kPa,最大位移和最大冻结深度分别为 25.99 mm 和 1.42 m,可以看出,施作护坡之后,最大位移和最大冻结深度都减小了很多。因此,护坡可有效地保护边坡,降低其受温度的影响,减少边坡的冻胀。尽管最大剪应力稍有增大,但从安全系数上看,增设护坡后,安全系数由原来的 1.38 变成 1.51,边坡稳定性有所增强。因此,季冻区边坡施加防护后可提高边坡的抗冻稳定性。

#### 4 结论

基于带有相变的非稳态温度场理论,利用有限元软件 ANSYS,对影响边坡稳定的因素进行了分析,得出以下几点结论:

- 1) 影响季冻区边坡稳定的因素主要分为边坡形态、外部环境温度、土的性质 3 大类,其中温度为重要的影响因素。
- 2) 土层含水率是影响冻土边坡稳定性的重要因素之一,边坡最大位移、最大剪应力和最大冻土厚度都与含水率呈正相关,安全系数也随表层含水率的增加而减小,边坡稳定性降低。因此,对于季冻区边坡应设置完善的排水设施来截留地表水和排除地下水,防止边坡冻胀失稳。
- 3) 环境温度是影响边坡稳定的又一个重要因素,环境温度降低,边坡冻胀越严重,边坡稳定性越差;当环境温度处于负温度值时,边坡最大位移、最大剪应力和最大冻结深度对温度的灵敏度随温度的降低逐渐减小。
- 4) 边坡坡度越缓和,边坡稳定性越好,且最大剪应力和最大冻结深度都随着坡率的减小呈单调递减;此外,边坡的高度增加不利于边坡的稳定。因此,实际工程中应选择适当缓和的边坡,同时应尽量采用较少的边坡级数。
- 5) 施作护坡后,边坡最大冻结深度和最大位移有效减小,且安全系数由原来的 1.38 变成 1.51,即季冻区边坡施加防护后可有效降低边坡受温度的影响,减少边坡的冻胀,提高边坡的抗冻稳定性。

## 参考文献:

- [1] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] 勒德武, 牛富俊, 李宁. 青藏高原多年冻土区热融滑塌变形现场监测分析[J]. 工程地质学报, 2006, 14(05): 677-682.
- [3] 孙意. 青藏铁路五道梁地区保护冻土路基稳定性措施研究[D]. 西南交通大学, 2004: 33-95.
- [4] 宋高嵩, 陈阳东, 温福春, 等. 季冻区路基边坡的水稳定性影响分析与防治[J]. 公路交通科技, 2005(6): 65-67.
- [5] 牛富俊, 程国栋, 赖远明, 等. 青藏高原多年冻土区热融滑塌型斜坡失稳研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 402-406.
- [6] 谷宪民. 季冻区道路冻胀翻浆机理及防治研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007: 32-102.
- [7] 殷坤龙. 国际滑坡研究的新进展[J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(5): 1-3.
- [8] 彭丽云, 刘建坤, 田亚护. 粉质粘土的冻胀特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2009(6): 62-67.
- [9] 赵坚. 季冻区公路土质路堑边坡浅层稳定性分析[J]. 北方交通, 2010(12): 1-5.
- [10] WEI SHAN, ZHANG CHENG-CHENG, GUO YING. Mechanism of shallow slide on soil soad sutting slope during spring in seasonal srozen segeion[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012: 178-181.
- [11] 张世民. 青藏铁路多年冻土路基热-力稳定性数值仿真分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2012(S1): 82-87.
- [12] KAY B D, GROENEVELT. On the interaction of water and heat transport in frozen and unfrozen soil [J]. Soil Science, American Proceeding, 1974(38): 395-400.
- [13] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [14] 舒进. 寒区隧道温度场特性试验研究与数值模拟[D]. 上海同济大学, 2013: 26.

## Analysis on Stability Characteristics of Frozen High Slope Based on Coupling Effect of Temperature and Stress

Xu Ying, Ding Chunlin, Wu Keliang, Zhao Lingyin

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on a seasonal frozen high slope in JING-XIN highway, the coupling effect of the instantaneous temperature field with phase change and the stress field was considered. By using the finite analysis software ANSYS, the influences of moisture content, temperature, slope rate, slope protection on the slope displacement filed, stress field and temperature field were simulated separately. Besides, by comparing the safety coefficients, the influences of these factors on slope stability were judged. The calculated results are as follows. moisture content, slope rate and slope height are negatively correlated to stability, that is, the greater the indicators the less stable the slope; while as one of the most important conditions which influence the stability of seasonal frozen slopes, when the temperature is below  $-10^{\circ}\text{C}$ , the indicators are more sensitive, with the decrease of temperature, the sensitivities of these indicators decrease gradually; besides, the slope protection can effectively reduce the maximum displacement and frozen depth of slope, thus improving the stability of slope.

**Key words:** frozen high slope; stability; temperature-stress coupling field; numerical analysis; influence factors

(责任编辑 王建华)