

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.04.10

多年冻土边坡的水热力耦合分析及软件开发

董旭光^{1,2}, 董建华², 何天虎³, 代涛², 孙国栋²

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏银川 750021; 2. 兰州理工大学甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃兰州 730050; 3. 兰州理工大学理学院, 甘肃兰州 730050)

摘要: 为了快速准确掌握多年冻土边坡的冻融反应规律, 基于水热力耦合理论, 依托 MATLAB 编制了能反应土体多场耦合机制的有限元程序, 与经典试验对比吻合较好, 验证了程序的可靠性。据此开发了一套可独立运行、操作简便的多年冻土边坡水热力耦合分析软件, 介绍了软件的功能和开发过程。结合算例分析了冻融作用下冻土边坡的反应特性, 结果表明: 不同时刻边坡的温度、水分、应力和位移有明显差别, 在坡面冻融交界面出现剪应力最大值条带, 边坡水平位移在冻结完成时, 沿坡面大小基本相同, 融化期结束时为上小、下大, 融化时边坡的水平位移、未冻水含量均比冻结时大, 而剪应力最大值却小; 暖季多年冻土稳定性较差, 开发的软件对冻土边坡工程冻融计算有重要应用价值。

关键词: 多年冻土边坡; 水热力耦合; 冻融作用; 软件开发; 数值计算

中图分类号: TU475

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)04-0077-08

Coupling analysis and software development of Moisture-Heat-Stress fields of permafrost slope

DONG Xuguang^{1,2}, DONG Jianhua², HE Tianhu³, DAI Tao², SUN Guodong²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou

University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 3. School of Sciences, Lanzhou

University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: In order to master the laws of freeze-thaw reaction of permafrost slope efficiently, the finite element program to reflect the multi-field coupling mechanism is written with MATLAB based on the moisture-heat-stress coupled theory. Compared with the classical test, the process matches well and is proved reliable. Hereby, the moisture-heat-stress coupled analysis software of permafrost slope that can run efficiently and independently is developed, and its function and development process are introduced. Based on an example, the freeze-thaw characteristics of permafrost slope is analyzed and the results show that the temperature, moisture, stress and displacement of the slope varies obviously at different times. The maximum band of shear stress appears at the freeze-thaw interface. The horizontal displacement is almost same along the slope surface after freezing, while it is smaller on the top of slope and larger at the bottom during thawing. The horizontal displacement and unfrozen water of the slope during thawing are both larger than that during freezing, while the maximum of shear stress becomes smaller. The permafrost slope is unstable in warm season. The software in the paper is of great importance for the freeze-thaw calculation of permafrost slope.

收稿日期: 2019-12-25; 修订日期: 2020-02-24

基金项目: 宁夏自然科学基金(2018AAC03016); 国家自然科学基金(51808302); 宁夏青年科技人才托举工程第三批(TJGC2018093); 宁夏大学博士科研启动项目(2017067)

第一作者: 董旭光(1987-), 男, 甘肃通渭人, 结构工程专业, 博士, 副教授, 主要从事边坡工程灾害治理研究。E-mail: dxguang568@163.com

Keywords: permafrost slope; coupling of moisture, heat and stress fields; freeze-thaw; software development; numerical analysis

0 引言

多年冻土占我国国土面积的 21.5%,近年来在冻土区进行了大规模的土方开挖和填土工程建设,对地质环境的扰动使很多冻土边坡稳定性变差。如青藏公路 K3057 段附近发生融冻泥石流滑坡,K3035 段滑塌体在 5 年内向山顶后退约 100 m,泥石流滑塌体向青藏公路移动,即将影响公路的正常运营^[1]。牛富俊等^[2]将青藏高原冻土斜坡破坏划为:崩塌、蠕变、热融失稳和泥流等。边疆等^[3]对多年冻土区的主要冻害类型和特征进行归类,并提出防治措施。冯守中等^[4]对寒区岩质和土质边坡进行破坏机理分析,并给出了相应稳定性计算方法。刘红军等^[5]对寒区土质边坡冻融失稳及植被护坡进行了试验研究,监测表明:边坡冻结过程中,水分向冻结锋面迁移,木本植物护坡有助于减小边坡冻融失稳。靳德武^[6]探讨了低角度冻土斜坡的破坏机理,进行了冻融模型试验,给出了不同渗流条件下冻土边坡稳定性分析方法。LI 等^[7]对玉树成都县支梅村秋季牧场边坡失稳进行了数值模拟,发现造成失稳的主要原因是季节性霜冻和持续降水下渗引起的基底抗剪强度降低。赵梦怡等^[8]对康定县新都桥粗颗粒冻土道路边坡进行变形、气温、地温和地下水等长期观测表明:在冻结融化和积雪消融条件下,粗颗粒冻土边坡变形突增,坡面表层 1 m 内产生滑塌。董旭光^[9]针对多年冻土热融滑塌,基于主动保护冻土理念,提出区新型框架热锚管边坡支护结构,模拟和验证表明结构降温效果良好、控制变形能力强。查阅大量文献可知,目前对冻土边坡研究还较少,由于冻土是一种对温度极其敏感的含冰体,冻土边坡病害与其中水分的冻融和迁移有密切关系。因此,冻融作用下边坡失稳是水热力共同作用的结果,故基于水热力耦合研究冻土边坡的稳定具有重要意义。

国内外对水热力耦合进行了大量研究,如 HARLAN^[10]提出水-热耦合模型,随后又提出分凝势、水热力耦合和刚体冰模型等。陈飞熊^[11]建立了全面考虑冻土中骨架、冰、水三相介质水、热、力与变形耦合的数理方程。李洪升等^[12]将冻土视为弹性均质体,推导了冻结过程中水分、温度和应力耦合控制方程。LI 等^[13]在考虑冻土流变的弹黏塑性本构模型基础上,建立了描述土体冻融过程的水-热-力相互作用理论模

型,并对某水渠进行了计算。MA 等^[14]讨论了冰-水相变广义 Clausius-Clapeyron 方程的适用条件,并提出了更能真实反映土体冻结过程的动态模型。这些研究成果为分析冻土边坡稳定提供了坚实基础,然而水热力多场耦合计算过程复杂,传统的软件还无法直接模拟土体“冻胀融沉”现象,需要通过等效简化,为工程问题分析带来不便。因此,开发多场耦合分析软件对快速计算冻土边坡冻融反应特性有重要价值。

本文基于水热力三场耦合理论,编写了能反应土体冻胀融沉的多场耦合计算程序,开发了冻土边坡水热力耦合分析软件,建立了多年冻土边坡多场耦合计算模型,分析了冻融作用时边坡的温度、水分、应力和变形分布规律,为冻土边坡工程计算提供方便及参考。

1 冻土边坡水热力耦合控制方程

在周期性冻融循环作用下,冻土骨架和水的导热及冰-水相变作用,则冻土边坡中温度满足带相变瞬态温度场的热传导方程为^[11]:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + L \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \quad (1)$$

式中: C ——体积比热容;

T ——温度;

t ——时间;

x, y ——坐标系;

λ ——导热系数;

L ——相变潜热;

ρ_i ——冰的密度;

θ_i ——冰的体积含量。

冻融作用下冻土边坡中水分迁移以液态水进行,则水分迁移方程为^[12]:

$$\frac{\partial \theta_u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial \theta_u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D \frac{\partial \theta_u}{\partial y} \right) - \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \quad (2)$$

式中: θ_u ——未冻水体积含量;

D ——水分扩散系数;

ρ_w ——水的密度。

冻土未冻水含量与温度的联系方程为:

$$\theta_u = \begin{cases} a |T|^{-b} & T < 0 \\ \theta_w & T \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: a, b ——与土体性质有关的参数;

θ_w ——总含水量。

将式(1)代入式(2),并由(3)式的导出关系化简得到水热耦合方程为:

$$C^* \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda^* \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (4)$$

式中: $C^* = C + L\rho_w \frac{\partial \theta_u}{\partial t}$; $\lambda^* = \lambda + L\rho_w D \frac{\partial \theta_u}{\partial t}$

采用显热容法来考虑相变面,假设土体相变发生在 T_m 附近的一个温度范围内 ($T_m \pm \Delta T$), 则简化构造出体积热容和导热系数表达式为^[15]:

$$C = \begin{cases} C_f & T < T_m - \Delta T \\ \frac{C_f + C_u}{2} & T_m - \Delta T \leq T \leq T_m + \Delta T \\ C_u & T > T_m + \Delta T \end{cases} \quad (5)$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_f & T < T_m - \Delta T \\ \lambda_f + \frac{\lambda_u - \lambda_f}{2\Delta T} [T - (T_m - \Delta T)] & T_m - \Delta T \leq T \leq T_m + \Delta T \\ \lambda_u & T > T_m + \Delta T \end{cases} \quad (6)$$

式中: C_f ——冻土比热容;

λ_f ——冻土导热系数;

C_u ——融土比热容;

λ_u ——融土导热系数;

T_m ——相变区间中点温度;

ΔT ——相变区间中点温度与最高或最低相变温度的绝对差值。

冻土边坡的静力平衡微分方程为:

$$[\partial] \{ \sigma \} - \{ f \} = 0 \quad (7)$$

物理方程为^[12]:

$$\{ \sigma \} = [D_T] (\{ \varepsilon \} - \{ \varepsilon^v \}) \quad (8)$$

几何方程为:

$$\{ \varepsilon \} = [\partial]^T \{ u \} \quad (9)$$

式中: $[\partial]$ ——矩阵微分算子;

$\{ \sigma \}$ ——应力;

$\{ f \}$ ——体力;

$[D_T]$ ——与温度有关的弹性矩阵;

$\{ \varepsilon \}$ ——弹性应变;

$\{ \varepsilon^v \}$ ——冻胀或融化引起的应变;

$\{ u \}$ ——位移。

$$\text{其中, } [\partial] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}, \quad [D_T] =$$

$$\frac{E}{(1+\mu)(1+2\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & 0 \\ \mu & 1-\mu & 0 \\ 0 & 0 & (1-2\mu)/2 \end{bmatrix}, \quad E =$$

$a_1 + b_1 |T|^m$, $\mu = a_2 + b_2 |T|$, $\{ \varepsilon^v \} = \{ \varepsilon_x^v \varepsilon_y^v \gamma_{xy}^v \}$, 冻结

时, $\varepsilon_x^v = \varepsilon_y^v = \frac{1}{3} \{ 1.09(\theta_0 + \Delta\theta - \theta_u) + (\theta_u - n) \}$,

$\gamma_{xy}^v = 0$; 融化时, $\varepsilon_x^v = \varepsilon_y^v = \frac{1}{3} A$, $\gamma_{xy}^v = 0$ 。

式中: E ——弹性模量;

μ ——泊松比;

θ_0 ——初始含水量;

$\Delta\theta$ ——在一定时间内的水分迁移量;

n ——土的孔隙率;

A ——融沉系数;

a_1, b_1, a_2, b_2, m ——与土性有关的参数, 取值参见文献^[15-16]。

方程(1)~(9)组成了多年冻土边坡的水热力耦合方程组。由于土体热力学参数随温度而变化, 并在计算模型区域内有一个随时间变化的冻融界面, 冻融界面产生相变, 因此, 上述方程描述的是一个空间大时间尺度的强非线性问题, 无法获得解析解, 故采用数值方法进行求解, 本文将冻土边坡控制方程在空间域采用有限元离散, 时间域采用有限差分离散, 两者相结合迭代求解, 基于 Matlab 平台开发多年冻土边坡多场耦合计算软件。

2 程序验证及软件开发

2.1 文献程序验证

为了检验编制的水热力耦合程序的正确性, 采用 PENNER^[17] 研究冻土冰透镜体形成过程实验和 MU 等^[18] 对该实验数值计算, 验证本文水热力耦合程序的正确性。土体热学、力学参数和边界条件均与文献相同, 分析模型见图 1, 温度边界见图 2。利用开发的程

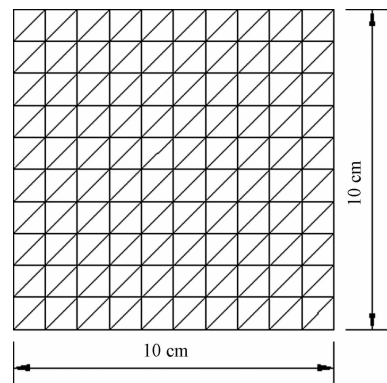


图1 PENNER 实验试样的有限元数值分析模型

Fig.1 FEM of PENNER experiment

序计算,选取冻结深度和冻胀量进行对比分析,结果如图 3 和图 4 所示。

试验用土的含水量为 0.35,未冻水和土体负温之间的函数关系^[18]:

$$n_w = \begin{cases} 0.35 & T \geq -0.11 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ 0.104\ 109(-T)^{-0.556\ 4} & T < -0.11 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (10)$$

表 1 模型土的热力学参数

Table 1 Thermal parameters of soils

成分	土性参数	
	热容 $C/(\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1})$	导热系数 $\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
水	4.18×10^6	0.602
冰	1.93×10^6	2.22
土颗粒	2.2×10^6	1.95

冻土视为线弹性体,冻土和未冻土泊松比均取 0.3,未冻时弹性模量 11.2 MPa,冻结时弹性模量为:

$$E_0 = 4 \times 10^2 |T|^{0.636} \quad (11)$$

土体导水系数用 Horiguchi 实验结果:

$$k = \begin{cases} 3.072 \times 10^{-11} e^{13.438T} & T > -0.3 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ 3.453 \times 10^{-13} & T \leq -0.3 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (12)$$

温度初始和边界条件:土体顶部为暖端;底部为冷端,进行由下向上冻结。边界条件如图 2 所示^[17-18]。为了模拟冻结前试样的初始状态,将 $t=0$ 时刻的上边界和下边界温度作为初始温度,利用初始温度条件和土体的热参数及其它特性参数求解 Laplace 方程,求得计算区域温度场的估计值,修正参数,再继续计算直至稳定温度场作为初始温度场。

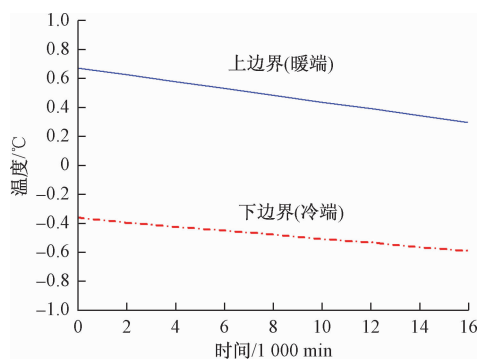


图 2 温度边界条件

Fig. 2 Boundary conditions of temperature

水分边界条件:土体内为饱和土体,冻结时从底部边界(从暖端)进行水分补给。

位移边界条件:土体底部约束,左右两侧为法向约束,顶部为自由位移边界。

由图 3 和图 4 可知,本文得到不同时刻的冻结深

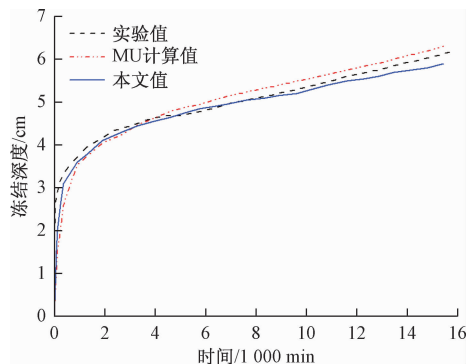


图 3 冻结深度随时间变化的曲线

Fig. 3 Freezing depths at different time

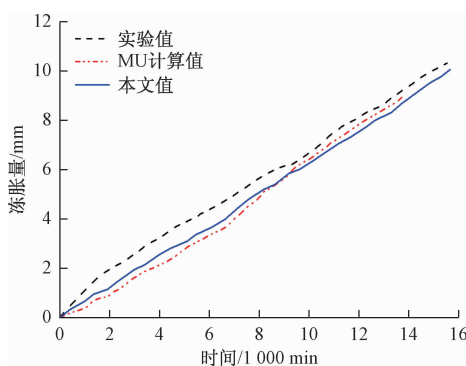


图 4 冻胀量随时间的变化曲线

Fig. 4 Variation of heave deformation with time

度比实验值略小,而比 MU^[18] 计算结果更接近试验值;各时刻冻胀量比实验值稍小,与 MU^[18] 计算相比前半段偏大,后半段偏小。综合可知,本文得到的冻结深度和冻胀量的变化规律与 PENNER 实验 MU 分析结果规律相符,数值相近,说明编制的程序是可靠和有效的。

2.2 软件开发

依托 MATLAB^[19] 平台,基于水热力耦合理论,开发了可独立运行、面向对象、界面友好和操作简便的多年冻土边坡水热力耦合分析软件。该软件包括前处理器(模型尺寸、土体物理参数的输入和网格划分),求解器(迭代求解)和后处理器(结果保存和云图显示),开发流程图如图 5 所示,软件主界面、模型生成、参数输入和计算结果显示界面见图 6~图 7。该软件能高效、准确实现外界温度作用下多年冻土边坡的温度、水分、应力和位移计算,对冻土边坡工程计算有重要的理论意义和应用价值。

3 算例分析

3.1 计算模型

青藏高原大阪山地区某多年冻土边坡,坡高

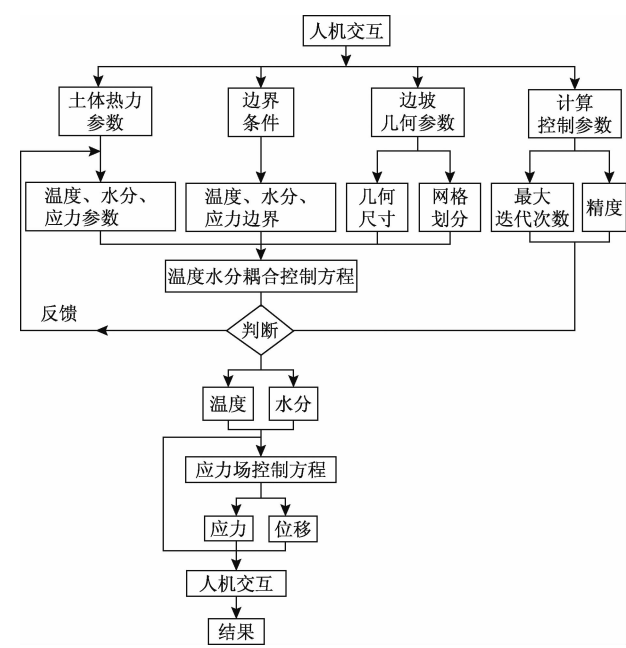


图 5 软件程序设计框图
Fig. 5 Design diagram of software

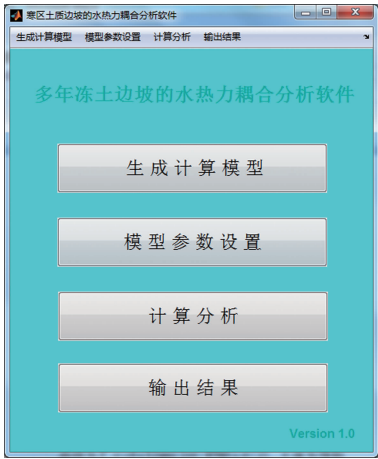


图 6 软件主界面
Fig. 6 Main interface of software

5.0 m, 坡度 45°。该地区气温变化曲线为 $T_a = -3 + 12\sin(2\pi t/8760 + \pi/2)$, 土层为单一均质饱和黏土, 土体物理参数见表 2, 土体干密度 $\rho_d/(\text{kg}/\text{m}^3)$, 初始含水量 θ_0 , 冻土未冻水含量与温度关系参数 a 和 b; 弹性模量, 泊松比与温度关系参数 a_1, b_1, a_2, b_2 和 m; 融沉系数 A; 热学参数见表 3, 融土热容 $C_u/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$, 导热系数 $\lambda_u/(\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$ 和水分扩散系数 $D_u/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$; 冻土热容 $C_f/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$, 导热系数 $\lambda_f/(\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$ 和水分扩散系数 $D_f/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$, 有限元计算模型见图 8。

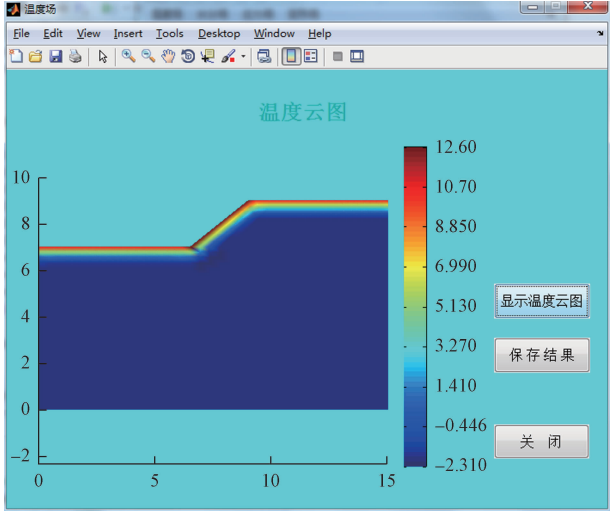


图 7 温度云图绘制界面
Fig. 7 Interface of the temperature nephogram

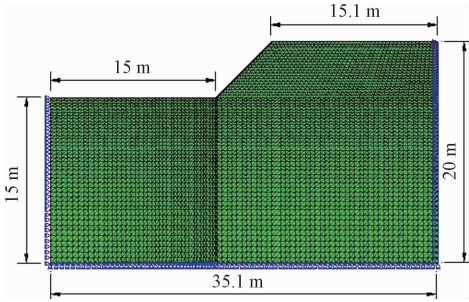


图 8 有限元计算模型
Fig. 8 Calculation model of finite element

3.2 边界条件和初始条件

温度边界: 根据实测结果, 坡面为 $T_s = 0.7 + 13\sin(2\pi t/8760 + \pi/2)$, 坡脚和坡顶为 $T_b = -1.5 + 12\sin(2\pi t/8760 + \pi/2)$, 两侧绝热, 底边热流密度为 $0.06 \text{ W}/\text{m}^2$ 。

水分边界: 不考虑水分与外界蒸腾和入渗交换。

位移边界: 两侧边为水平支撑, 底边为水平和竖向支撑, 其余各边自由。

求解过程: 含水率取冻土边坡实际值, 然后给温度赋予初始值, 结合边界求解式(4)和(2), 进行冻融循环计算, 直至季节活动层以下的温度和水分保持稳定, 同一时刻各节点值逐年相同为止, 以此时各节点的温度、水分作为冻土层稳定的初始值, 再求解式(7)~(9)得到初始应力, 重新计算外界季节冻融作用下, 边坡土体的响应。

3.3 结果分析

边坡经历一个冻融周期, 冻结期(寒季)从 10 月中旬至来年 4 月中旬(取 4 月 15 日), 融化期(暖季)

从4月中旬至10月中旬(取10月15日)。冻结期和融化期结束是边坡在冻融作用下的两个极端状态,选取这两个时刻进行冻融分析。

表2 边坡土体力学参数

Table 2 Mechanical parameters of slope

物理量	$\rho_d/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	θ	a	b	a_1/MPa	b_1	a_2/MPa	b_2	m	A
数值	1 500	20%	9.982	0.435	8	18	0.3	0.02	0.6	0.6

表3 边坡土体热学参数

Table 3 Thermal parameters of slope

物理量	$\lambda_u/(\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	$C_u/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	$\lambda_f/(\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	$C_f/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	$D_u/(\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	$D_f/(\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$
数值	1.09	$2.509\ 2\times10^6$	1.22	$2.070\ 1\times10^6$	1.53×10^{-8}	3.1×10^{-11}

(1)冻融作用下边坡温度场分析

由图9可知,冻融作用下边坡的活动层发生冻融交替变化,不同时刻边坡温度场有明显差别。冻结结束时,边坡处于完全冻结状态,坡面负温较大的厚度比坡顶和坡脚均薄。融化结束时,坡面融化厚度比坡顶和坡脚都大,冻融对坡面温度影响较大,热融可引起边坡滑移,此与实际观测相符。

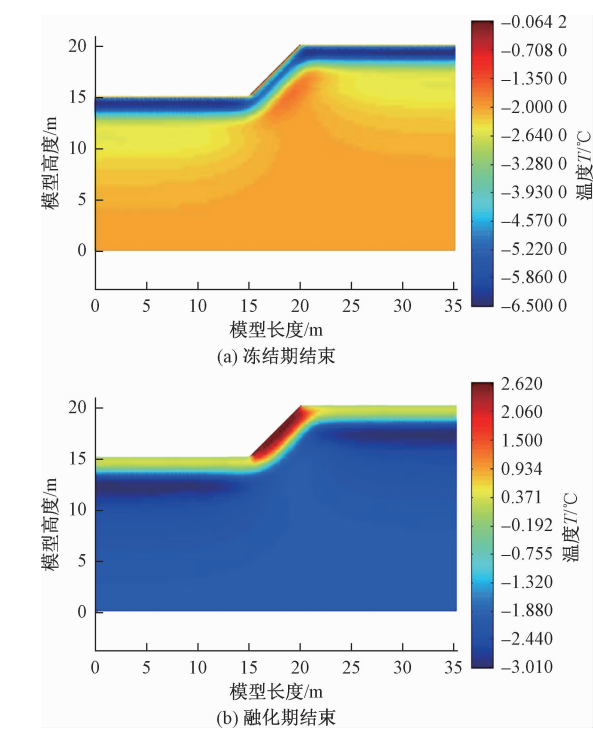


图9 不同时刻边坡温度云图

Fig.9 The temperature of slope at different times

(2)冻融作用下边坡水分场分析

从图10可以看出,冻结期结束时,活动层土体的未冻水含量比其他部位低,未冻水含量与温度同步变化,大小由温度和土性共同决定。融化结束时,活动层土体的未冻水含量明显比其他部位高,在冻融交界面

处最高,含水量最大值大于初始含水量20%。融化期结束时未冻水含量略大于冻结时,说明冻融作用下土体发生了水分迁移,总含水量增加。

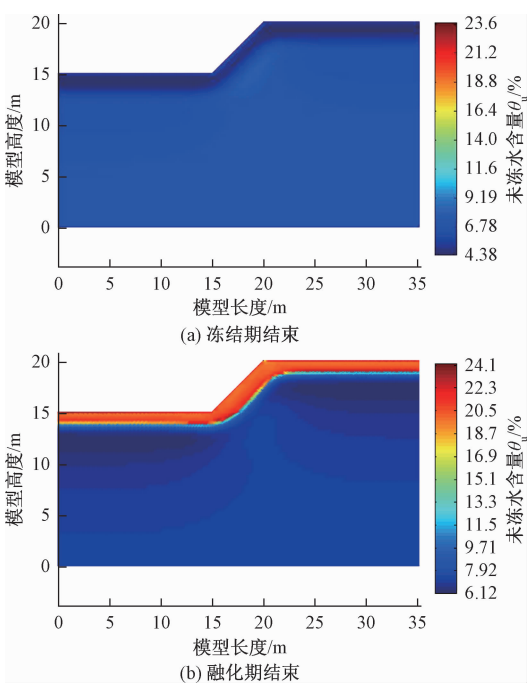


图10 不同时刻边坡的未冻水含量

Fig.10 The unfrozen water of slope at different times

(3)冻融作用下边坡剪应力分析

由图11可知,无论冻结,还是融化结束时,坡体冻融交界面附近剪应力达到最大且呈带状分布,条带与坡面大致平行,但在坡顶和坡脚附近发生转折、小范围延伸而未贯通坡顶和坡脚,其余部分剪应力较小且分布均匀。冻结时坡面的剪应力大于融化时。原因在于:坡面上限以下土体常年处于冻结稳定状态,以上土体处于冻融交替状态,上限附近水分积聚,在自重作用下,坡面上限为冻土边坡潜在滑动面,故剪应力远大于其他部位。冻结时土体的弹性模量大于融化时,导致

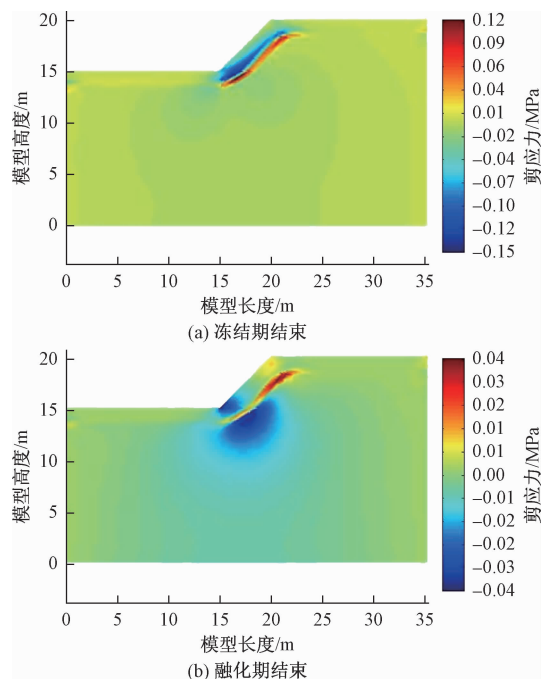


图 11 不同时刻边坡剪应力云图

Fig. 11 The shear stress of slope at different times

冻结时剪应力较大。

(4) 冻融作用下边坡水平位移分析

由图 12 可知,冻结期结束时,坡面水平位移大小基本相同,中下部稍大,水平位移主要由土体冻胀引起;融化期结束时,边坡水平位移为上小、下大,呈“凸肚”状。边坡顶部受双向冻、融影响,顶部位移略大于顶部之下小范围土体的位移。冻结时边坡的水平位移比融化时小很多,原因在于:冻结时(即冬季),土体强度参数提高,且形成了冻结土骨架,主要为冻胀位移,坡体变形较小,稳定性较好;热融时(即暖季)土体强度参数降低,未冻水含量提高,边坡在自重和热融作用下稳定性降低,可能发生滑移,工程设计时应重视暖季热融失稳。

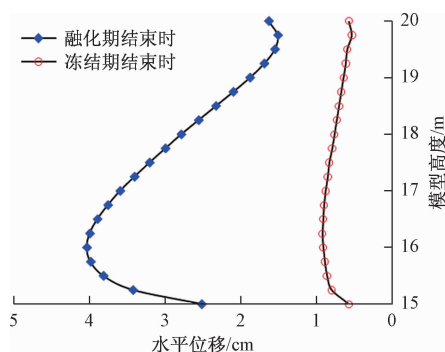


图 12 不同时刻边坡水平位移

Fig. 12 Horizontal displacement of slope at different times

4 结论

(1) 基于水热力耦合理论,依托 MATLAB 编制了能反应冻融作用下土体多场耦合机制的有限元程序,并与经典的 PENNER^[17] 试验和 MU 等^[18] 模拟结果进行了对比分析,验证了程序的可靠性,开发了多年冻土边坡水热力耦合分析软件。

(2) 冻融作用下边坡的活动层发生冻融交替变化,不同时刻冻土边坡温度场有明显差别,与坡面大致平行的冻融交界面出现剪应力最大条带。冻结期结束时,坡面水平位移大小基本相同,中下部稍大;融化结束时,边坡水平位移为上小、下大,呈“凸肚”状。融化结束时边坡的未冻水含量,水平位移比冻结时大,剪应力最大值比冻结时小;暖季多年冻土稳定性较差。

参考文献:

- [1] 马巍,周国庆,牛富俊,等. 青藏高原重大冻土工程的基础研究进展与展望[J]. 中国基础科学, 2016, 18(6): 9-19. [MA W, ZHOU G Q, NIU F J, et al. Progress and prospect of the basic research on the major permafrost projects in the Qinghai-Tibet plateau[J]. China Basic Science, 2016, 18(6): 9-19. (in Chinese)]
- [2] 牛富俊,张鲁新,俞祁浩,等. 青藏高原多年冻土区斜坡类型及典型斜坡稳定性研究[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 608-613. [NIU F J, ZHANG L X, YU Q H, et al. Study on slope types and stability of typical slopes in permafrost regions of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 608-613. (in Chinese)]
- [3] 边疆,寇丽娜,绽蓓蕾. 青藏高原多年冻土区冻害类型及防治[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(3): 129-133. [BIAN J, KOU L N, ZHAN B L. The classification of frozen hazards and protecting approach of permafrost region In Tibetan Plateau permafrost region[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(3): 129-133. (in Chinese)]
- [4] 冯守中,闫澍旺,崔琳. 严寒地区路堑边坡破坏机理及稳定计算分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊1): 155-159. [FENG S Z, YAN S W, CUI L. Failure mechanism of highway slope in severe cold area and its stability computation analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(Sup1): 155-159. (in Chinese)]
- [5] 刘红军,郭颖,单炜,等. 土质路堑边坡冻融失稳

- 及植被护坡机理研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8):1197-1203. [LIU H J, GUO Y, SHAN W, et al. Instability of soil cutting slopes caused by freeze-thaw and reinforcement mechanism by vegetation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(8):1197-1203. (in Chinese)]
- [6] 靳德武. 青藏高原多年冻土区斜坡稳定性研究[D]. 西安: 长安大学, 2004. [JIN D W. Study on slope stability in permafrost region of Qinghai-Tibet Plateau[D]. Xi'an: Changan University, 2004. (in Chinese)]
- [7] LI D S, WEN Z, LUO J, et al. Slope failure induced by cold snap and continuous precipitation in the seasonal frozen area of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2019, 694:1-10.
- [8] 赵梦怡, 谢强, 朱磊, 等. 高原季节性粗颗粒冻土边坡破坏的现场观测试验[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(7):1666-1672. [ZHAO M Y, XIE Q, ZHU L, et al. Field observation of slope failure of seasonal coarse grained frozen soil in plateau[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(7):1666-1672. (in Chinese)]
- [9] 董旭光. 多年冻土区新型框架热锚管边坡支护结构的工作机理及试验研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017. [DONG X G. Research on the working mechanism and experiment of the new frame heat anchor pipe supporting structure for permafrost slope[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017. (in Chinese)]
- [10] HARLAN R L. Analysis of coupled heat - fluid transport in partially frozen soil[J]. Water Resources Research, 1973, 9(5):1314-1323.
- [11] 陈飞熊. 饱和正冻土温度场、水分场和变形场三场耦合理论框架[D]. 西安: 西安理工大学, 2001. [CHEN F X. The fully coupled modeling of the thermal moisture deformation behavior for the saturated freezing soils[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2001. (in Chinese)]
- [12] 李洪升, 刘增利, 梁承姬. 冻土水热力耦合作用的数学模型及数值模拟[J]. 力学学报, 2001, 33(5):621-629. [LI H S, LIU Z L, LIANG C J. Mathematical model for coupled moisture, heat and stress field and numerical simulation of frozen soil[J]. Acta Mechanica Sinica, 2001, 33(5):621-629. (in Chinese)]
- [13] LI S Y, LAI Y M, PEI W S, et al. Moisture-temperature changes and freeze-thaw hazards on a canal in seasonally frozen regions[J]. Natural Hazards, 2014, 72(2):287-308.
- [14] MA W, ZHANG L H, YANG C S. Discussion of the applicability of the generalized Clausius - Clapeyron equation and the frozen fringe process[J]. Earth-Science Reviews, 2015, 142:47-59.
- [15] 赖远明, 张明义, 李双洋, 等. 寒区工程理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009. [LAI Y M, ZHANG M Y, LI S Y, et al. Theory and application of cold regions engineering[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)]
- [16] 马巍, 王大雁. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014. [MA W, WANG D Y. Frozen soil mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)]
- [17] PENNER E. Aspects of ice lens growth in soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 1986, 13(1):91-100.
- [18] MU S, LADANYI B. Modelling of coupled heat, moisture and stress field in freezing soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 1987, 14(3):237-246.
- [19] 张志涌, 杨祖樱. MATLAB 教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006. [ZHANG Z Y, YANG Z Y. Matlab tutorial[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2006. (in Chinese)]

封面照片说明

金沙江色拉滑坡

金沙江色拉滑坡位于西藏昌都市贡觉县敏都乡,金沙江干流右岸,距下游拉哇水电站 63 km,距上游叶巴滩水电站 23 km。滑坡后缘高程 3 342 m,前缘高程 2 649 m,相对高差 693 m。平面形态近似舌状,纵长 1 280 ~ 1 551 m,横宽 986 ~ 1 046 m,面积约 $1.63 \times 10^6 \text{ m}^2$,估算平均厚度约 40 m,体积约 $6.52 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。斜坡上陡下缓,整体坡度 $30^\circ \sim 35^\circ$,上部最陡处 $40^\circ \sim 45^\circ$ 。

色拉滑坡处于金沙江缝合带内,受青藏高原向东侧挤压作用,断裂构造极为发育,岩体结构破碎疏松,斜坡中后部发育大量拉裂缝和冲沟,前部坡面解体变形严重。坡脚受金沙江水流冲刷,局部滑塌形成高约 30 ~ 150m 的高陡临空面。滑坡目前处于蠕滑变形阶段,一旦遭遇极端降雨或地震情况,很有可能发生一次或多次滑动堵塞金沙江形成堰塞湖,将危及金沙江上下游沿岸城镇、道路及水利水电设施。

(中国地质环境监测院 朱赛楠 供稿)