

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.05.006

土工袋防渠道冻胀水-热-力耦合数值模拟

李卓¹, 范光亚¹, 刘斯宏², 王柳江²

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 根据水-热-力耦合计算模型, 编制相应的有限元计算程序, 并结合寒冷地区渠道工程进行数值计算, 分析渠道建成后2 a内渠坡的温度场、水分场及位移的分布规律。计算结果表明: 渠坡在冻融过程中表现出显著的冻胀、融沉变形特性, 且冻胀和融沉变形不可逆; 土工袋处理渠道对冻土渠坡具有较好的防冻胀效果, 土工袋具有较小的导热性, 可以有效减小渠坡内部土体温度受大气温度的影响, 从而减小渠坡发生冻胀融沉变化的可能性; 土工袋可以抑制毛细水和薄膜水的上升, 可减小土工袋层及下部土体中的水分迁移, 从而保持渠道内较为稳定的含水量, 减小渠坡表层的冻胀量; 土工袋具有一定的强度且在自身袋子张力作用下能够抑制部分冻胀变形, 从而减小渠道衬砌体由冻胀引起的破坏。同时, 渠道表层用土工袋处理后, 渠坡内部温度可以较快达到稳定状态, 运行2 a后可在地基2 m以下位置形成较为稳定的常年冻结层。

关键词: 土工袋; 渠道防冻胀; 水-热-力耦合; 温度场; 水分场; 应力场; 数值模拟; 寒冷地区

中图分类号: TU43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2018)05-0408-10

Moisture-heat-stress coupled numerical simulation of soilbags preventing the frost heaving of channel

LI Zhuo¹, FAN Guangya¹, LIU Sihong², WANG Liujiang²

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: According to the numerical model of moisture-heat-stress coupled field, the finite element algorithm for soilbags was built, and then one canal engineering project in the cold area has been analyzed to obtain the distributions of temperature field, moisture field and displacement within two years after the completion of project. The results show that the canal slope encounters significant frost heaving and melting deformation during the freezing and thawing process, and both the frost heaving and the melting deformation are irreversible. The geotextile treated channel has a good performance in preventing frost heaving of frozen soil slope. It also has the advantage of small thermal conductivity that can effectively reduce the influence of atmosphere temperature on the soil temperature inside canal slope, so as to reduce the possibility of frost heaving and melting settlement. At the same time, soilbags can suppress the rise of capillary water and film water and reduce the water immigration of the geotextile bag layer and the lower part, so as to maintain a more stable water content within the channel to reduce the frost heaving of canal surface. In addition, the geotextile bag has a certain strength, and under the action of its tension stress, the frost heaving can be suppressed, thereby reducing the damage of frost heaving on the channel lining. At last, with the treated surface of channel using the geotextile bag, the internal temperature of slope can quickly reach a steady state, and after 2 years, a more stable and perennial frozen layer is formed below 2 m of the ground.

Key words: soilbags; frost heaving prevention of channel; moisture-heat-stress coupled; temperature field; moisture field; stress field; numerical simulation; cold region

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0405104); 国家自然科学基金(51509164, 51879166); 南京水利科学研究院院基金(Y716009)

作者简介: 李卓(1979—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事土石坝工程和水工建筑物防冻胀研究。E-mail: zhuoli@nhri.cn

引用本文: 李卓, 范光亚, 刘斯宏, 等. 土工袋防渠道冻胀水热力耦合数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(5): 408-417.

LI Zhuo, FAN Guangya, LIU Sihong, et al. Moisture-heat-stress coupled numerical simulation of soilbags preventing the frost heaving of channel[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2018, 46(5): 408-417.

20 世纪 40 年代国内外学者开始进行渠道防冻胀试验研究,研究表明土体、温度和水分是产生冻胀的三要素,渠道及其建筑物冻胀是由土体冻胀所致^[1-2]。目前北方寒冷地区渠道防冻胀主要措施为“适应、回避、消减或消除冻胀”。李卓等^[3-4]为研究土工袋在北方寒冷地区的防冻胀效果,开展了冻融循环条件下土工袋处理渠道和常规渠道模型试验,验证了土工袋防渠道冻胀机理及防冻胀效果。北方寒冷地区渠道及建筑物在冻胀融沉过程中会发生一系列非常复杂的物理力学变化。当温度发生正负温度交替变化时,土体内的水分发生相变,从而引起土体强度和变形特征发生变化。因此,土体冻结或融化过程中温度场、水分场、应力场的相互作用是一个复杂的热力学、物理化学和力学的综合问题。Harlan^[5]提出了正冻土的水热耦合模型,后被许多研究者引用并发展;Taylor 等^[6]假设当含冰量达到某一临界值时会发生冻胀,对 Harlan 模型进行了改进;Guymon 等^[7]将改进后的模型应用于各种类型的地基,并将其应用于季节冻结和融化预报中。20 世纪 80 年代初期,根据 Miller 提出的冻结缘理论,Shen 等^[8]建立了水热力耦合模型,该模型具有一定的典型性,也是目前应用最广泛的。众多学者建立了全面考虑冻土中骨架、冰、水、气四相介质水、热、力与变形耦合作用的数理方程,在引进国外岩土工程软件的同时开发了饱和准饱和冻土介质温度场、水分场、变形场三场耦合问题的有限元分析软件,并在寒冷地区碎石桩复合地基工程中进行了验证^[9-12]。笔者根据冻土的水-热-力耦合效应,提出温度场、水分场和应力场耦合的计算模型,结合土工袋的热传导特性、水分迁移特性以及冻胀融沉变形特性,采用数值模拟的方法对土工袋处理渠道边坡进行水、热、力三场耦合分析。

1 冻土渠坡温度场和水分场的耦合模型

冻土渠道中热量的差异和改变会引起水分的迁移与转化,同时渠道中的水分通过改变土体热特性来改变土的温度。由于温度是影响水分运动不可忽视的因素,传统的等温模型不能准确地反映温度变化引起的渠坡中水分的迁移。因此,在单独研究水分场和温度场的基础上,通过考虑水分迁移对热物理参数的影响,以及温度变化引起的冰水相变对水分迁移和热物理参数的影响,建立渠道中温度场和水分场的耦合模型。

1.1 冻土水热耦合基本控制微分方程

1.1.1 温度场方程^[10-13]

冻结区域 Ω_f 内部为

$$C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) + L \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \quad (1)$$

未冻结区域 Ω_u 内部为

$$C_u \frac{\partial T_u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_u \frac{\partial T_u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_u \frac{\partial T_u}{\partial y} \right) \quad (2)$$

式中: T_f 、 C_f 、 λ_f —— Ω_f 内土体的温度、体积热容和导热系数; L ——冰水相变潜热; θ_i ——土体中冰的体积含量; ρ_i ——冰的密度; T_u 、 C_u 、 λ_u —— Ω_u 内土体的温度、体积热容和导热系数; t ——时间。

λ_f 和 λ_u 均随含水量变化而变化,含水量比较高时, λ_f 比 λ_u 大。

1.1.2 水分场方程

假设空气和水蒸气迁移对纯水迁移的影响可以忽略,则饱和和非饱和冻土冻结融化过程中二维稳定非稳定的质量迁移方程均可表示为

$$\frac{\partial \theta_u}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) \quad (3)$$

$$\psi = \Phi + Z \quad (4)$$

式中: ψ ——土水势; Φ ——土中水的容积势; Z ——重力势,一般情况下冻结层中水流量的重力势影响很小,可以忽略不计,则 $\psi = \Phi$; K_x 、 K_y —— x 和 y 方向的导水系数; ρ_w ——水的密度; θ_u ——未冻水体积含量,其与温度的关系为 $\theta_u = \theta_{\max}(T)$, $T \leq T_0$; T_0 ——土体冻结的临界温度。

将式(3)代入(1)可得

$$\left(C_f + L \rho_w \frac{\partial \theta_u}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\lambda_f + L \rho_w D \frac{\partial \theta_u}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\lambda_f + L \rho_w D \frac{\partial \theta_u}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \right] \quad (5)$$

其中

$$D = \frac{K}{c} \qquad c = \frac{\partial \theta_u}{\partial \Phi}$$

1.2 有限元计算方法

采用 Galerkin 加权余量法对温度场方程进行有限元公式推导,可得有限元求解公式:

$$D_1 [T(x,y,t)] = C^* \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda^* \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) - \lambda^* \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = 0 \tag{6}$$

加权余量公式、试探函数分别为

$$\int_R W_1 D_1 [T(x,y,t)] dx = 0 \qquad T(x,y,t) = T(x,y,t,T_1,T_2,\cdots,T_n) \tag{7}$$

合并式(6)~(7)可得

$$\iint_{D_1} W_1 \left[C^* \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda^* \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \lambda^* \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \right] dx dy = 0 \tag{8}$$

式中: D_1 ——平面温度场的定义域; W_1 ——加权函数,采用 Galerkin 法对加权函数定义 $W_1 = \frac{\partial T}{\partial T_1}$ 。

为了保证试探函数 $T(x,y,t)$ 能够满足边界条件,采用格林公式把区域内的面积分与边界上的线积分联系起来,从线积分中得出边界条件。将式(8)展开,并利用格林公式及在区域 D_1 边界上满足的关系式

$\left(-\frac{\partial T}{\partial y} dx + \frac{\partial T}{\partial x} dy = \frac{\partial T}{\partial n} ds \right)$ 可得

$$\frac{\partial J_{D_1}}{\partial T_1} = \iint_{D_1} W_1 \left(C^* \frac{\partial T}{\partial t} \right) dx dy + \iint_{D_1} \lambda^* \left(\frac{\partial W_1}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial W_1}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \right) dx dy - \oint_r C^* W_1 \frac{\partial T}{\partial n} ds = 0 \tag{9}$$

式中: J_{D_1} ——温度场的微分控制方程

改写式(9)得到温度场有限元计算公式为

$$\boldsymbol{M} \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} + \boldsymbol{K} \{ T \} = \{ F_T \} \tag{10}$$

式中: F_T 、 K 、 M ——形函数和边界函数方程。

同理,水分场的有限元计算公式为

$$\boldsymbol{P} \left\{ \frac{\partial \theta_u}{\partial t} \right\} + \boldsymbol{S} \{ \theta_u \} = \{ F_w \} \tag{11}$$

2 冻土应力场基本理论及有限元方法

2.1 基本理论

在荷载作用下,土的变形包括瞬时变形和蠕变变形,再考虑到土冻胀和融化时会引起自身体积的变化,这种变形只发生在相变过程,土的变形应由瞬时应变($\varepsilon_e(t)$)、蠕变应变($\varepsilon_c(t)$)以及温度引起的应变($\varepsilon_v(t)$)三部分组成^[11,13]。 $\varepsilon_e(t)$ 和 $\varepsilon_c(t)$ 由应力引起,而 $\varepsilon_v(t)$ 与应力无关。冻结过程中,冻土的体积变化是由原土中的部分水和迁移来的部分水冻结成冰引起的。在冻结和融化过程中假设土颗粒不可压缩,则 $\varepsilon_v(t)$ 可由式(12)^[13]给出。

$$\varepsilon_v(t) = 1.09(\theta_0 + \Delta\theta - \theta_u) + (\theta_u - n) \tag{12}$$

式中: θ_0 ——初始含水量; $\Delta\theta$ ——迁移来的水量; n ——孔隙率。

a. 弹性应变增量。确定土体的弹性参数 E 和 μ 之后,即可计算瞬时应变。此时,若知 Δt_i 时段的应力增量 $\Delta\sigma_i$ 及弹性参数 E_i 、 μ_i ,则可按式(13)计算 Δt_i 时段由 $\Delta\sigma_i$ 引起的瞬时应变。

$$\Delta\varepsilon_{ei} = \frac{1}{E_i} \boldsymbol{Q} \Delta\sigma_i \tag{13}$$

式中: Q ——矩阵微分算子

b. 复杂应力状态下的蠕变应变增量为

$$\Delta\varepsilon_c = C_1 C_3 \bar{\sigma}^{C_2} t^{C_3-1} e^{-\frac{C_4}{T}} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma} \Delta t \tag{14}$$

式中: $\bar{\sigma}$ ——等效应力; C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 ——蠕变试验系数。

c. 自身体积应变增量。冻土渠基的自身变形主要考虑温度变化所引起的冻胀和融缩。定义冻胀系数为冻后增大的体积与冻前体积之比;融沉系数是冻土融化后减小的体积与融前体积之比。冻胀和融沉并非简单的互逆过程,冻胀系数和融沉系数常常不相等,冻胀系数和融沉系数均为体变系数,以符号 η 表示,可实测得到,则自身体积应变增量可以表示为

$$\Delta \epsilon_v = \left[\frac{1}{3} \eta \Delta f_s \quad \frac{1}{3} \eta \Delta f \quad \frac{1}{3} \eta \Delta f \quad 0 \quad 0 \quad 0 \right]^T \tag{15}$$

式中: Δf_s ——固相率的变化值,表征相变完成的程度; Δf ——固相率的变化值,表征相变完成的程度。

2.2 应力场有限元计算

由物理方程、几何方程和平衡方程,可得任一时段 Δt_i 内整个区域内的有限元支配方程:

$$\mathbf{K} \{ \Delta \delta_i \} = \{ \Delta \mathbf{P}_i \}_L + \{ \Delta \mathbf{P}_i \}_C + \{ \Delta \mathbf{P}_i \}_V \tag{16}$$

式中: $\mathbf{K}$ ——整体刚度矩阵,由单元刚度矩阵合成; $\{ \Delta \delta_i \}$ —— Δt_i 时段的整体结点位移增量列阵; $\{ \Delta \mathbf{P}_i \}_L$ 、 $\{ \Delta \mathbf{P}_i \}_C$ 、 $\{ \Delta \mathbf{P}_i \}_V$ —— Δt_i 时段由外荷载、蠕变、土体相变引起的结点荷载增量列阵。

$$\{ \Delta \epsilon_i \} = \mathbf{B} \{ \Delta \delta_i \} \tag{17}$$

式中: $\mathbf{B}$ ——矩阵微分算子

通过整体支配方程求解 $\{ \Delta \delta_i \}$,进而根据式(17)求得整体应变增量 $\{ \Delta \epsilon_i \}$,继而根据应力-应变本构关系求得应力增量。

3 寒冷地区渠道的水热力耦合数值分析

3.1 计算模型及参数

以北方寒冷地区渠道为研究对象,设渠道土质均匀,渠道无限长,取渠道的一半计算模型如图 1 所示^[13]。

初始条件:假设渠道在夏天完成施工,初始温度 $T|_{t=0} = 8.6\text{ }^{\circ}\text{C}$;渠道地基土的初始体积含水量为 25%,密度为 $1\,950\text{ kg/m}^3$ 。边界条件:边界 $ABCDE$ 上的温度随时间变化; AHG 在对称轴上,两侧无热交换,所以温度条件为绝热;对于边界 EF ,当沿水平向右侧方向取足够长的距离时,可认为温度没有变化;边界 GF 距上边界较大,其温度条件是恒温 $8.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此,温度边界条件可用式(18)~(19)表示^[14-20]。

天然地表 DE 边的温度按下式表示:

$$T_n = -3.0 + 19.5 \sin \left(\frac{2\pi}{8\,760} t_h + \frac{\pi}{2} + \alpha_0 \right) \tag{18}$$

渠道 $ABCD$ 边的温度按如下规律变化:

$$T_n = -0.5 + 22.0 \sin \left(\frac{2\pi}{8\,760} t_h + \frac{\pi}{2} + \alpha_0 \right) \tag{19}$$

式中: t_h ——时间变量,当 $\alpha_0 = 0$ 时, $t_h = 0$ 对应的初始时间为 7 月 15 日,可通过调整 α_0 来改变 $t_h = 0$ 对应的初始时间。

边界 AHG 和 EF 可视为绝热边界, FG 为固定温度边界。

水分边界条件:下边界 FG 处于地下水位以下,故认为下边界的含水量为常数,在整个过程中视为不变(25%)。位移边界条件:在边界 AHG 和 EF 上, $u_x = 0$;下边界 FG 上, $u_x = 0$ 、 $u_y = 0$ 。计算域渠坡水热参数^[2,5-6]如下:土工袋、土体的 λ_f 分别为 $0.346\text{ W/(m}\cdot^{\circ}\text{C)}$ 、 $1.351\text{ W/(m}\cdot^{\circ}\text{C)}$, C_f 分别为 1.01×10^6 、 $1.88 \times 10^6\text{ J/(m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C)}$, λ_u 分别为 $0.346\text{ W/(m}\cdot^{\circ}\text{C)}$ 、 $1.125\text{ W/(m}\cdot^{\circ}\text{C)}$, C_u 分别为 $1.01 \times 10^6\text{ J/(m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C)}$ 、 $2.36 \times 10^6\text{ J/(m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C)}$;土体 $D = 1.7 \times 10^{-8}\text{ m}^2/\text{s}$ 。渠道材料蠕变和体变参数^[2,5-6]如下:土体的 $C_1 = 2.983 \times 10^{-7}$ 、 $C_2 = 1.071$ 、 $C_3 = 0.065$ 、 $C_4 = 0.524$ 、 $\eta = 0.09$;土工袋的 $\eta = 0.02$ 。冻土中的未冻水含量和

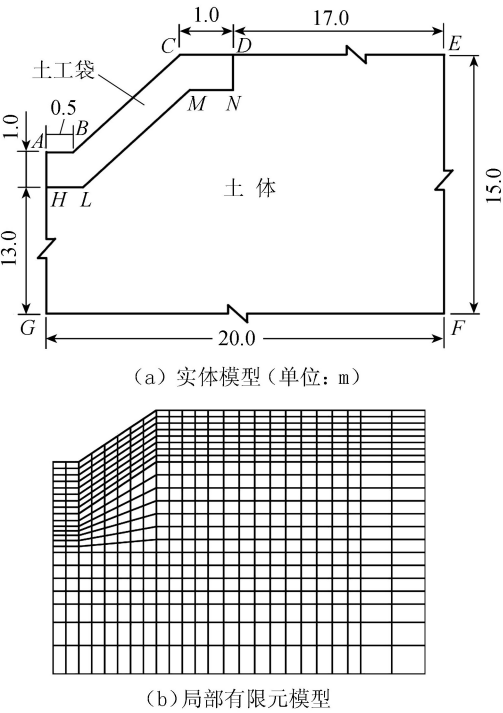


图 1 渠道计算模型

Fig. 1 Calculating model of the channel

温度之间保持着动态平衡关系,即随着温度降低,未冻水含量减小,反之亦然,因此可用式(20)表达^[2]:

$$\theta_u = a |T|^{-b}$$

(20)

式中: a 、 b ——与土的性质有关的试验常数,计算域中土体的 $a=10.217\%$ 、 $b=0.242$ 。

冻土的力学性质随土温的不同而发生变化,研究表明^[6],冻土的弹性模量、泊松比与土温的关系分别为

$$E = a_1 + b_1 |T|^m \quad \mu = a_2 + b_2 |T|$$

(21)

式中: a_i 和 b_i ——试验常数, $a_1=10\text{ MPa}$, $b_1=50$, $a_2=0.4$, $b_2=-0.01$; m ——小于1的非线性指数,通常取0.6。

3.2 计算结果及分析

在数值分析中,为消除截断边界对计算结果的影响,将计算域取得比较大,但是人们往往比较关注渠道及其附近区域的温度、水分和变形情况,同时根据气温观测资料可知,在每年的1月中旬气温最低、7月中旬气温最高,所以仅给出渠坡附近区域第1年、第2年1月15日和7月15日的数值分析结果。

3.2.1 常规渠道

由图2可知,渠道修建后土体内的温度分布状态发生了改变,与天然地表下的各等温线位置相比,渠道边坡和渠底以下土体中的等温线在气温最低与最高时均有大幅度的变化,所以存在产生渠道冻胀融沉的可能性。

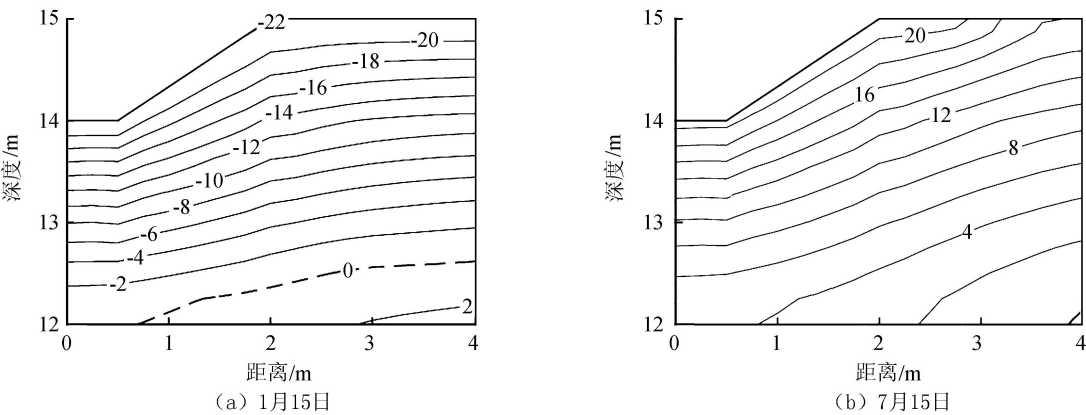


图2 常规渠道建成后第1年的温度分布(单位:℃)

Fig.2 Temperature distributions of the traditional channel in the first year after construction (Units: °C)

图3为常规渠道建成后第1年1月15日和7月15日的体积含水量分布状况。计算时假设渠道建成后整个计算域内的地基土初始体积含水量为25%,从图3可以看出,在温度小于零的冻结区,体积含水量明显增大,而在冻结锋面以下体积含水量则显著减小,这主要是由于随着冬季来临,气温降低,渠道及天然地表自上而下开始冻结,在冻结过程中,地基下部的水分不断地向上迁移,在冻结锋面附近聚结成冰,从而使冻结区产生冻胀变形。由于渠道为填方渠道,渠道的地下水位埋设较深(在地表以下15 m),无法形成饱和和渗流通道,因此冻结锋面以下体积含水量逐渐减小;而对于地基中水分补给较为充足的情况,地下水在毛细力作用下不断向冻结锋面迁移凝结成冰,在该情况下冬季越容易发生冻胀破坏。春夏季,随着气温逐渐回暖,渠坡表面至上而下开始解冻,由图3(b)可以看到整个解冻区的体积含水量分布趋向于均匀,且体积含水量较高(约为

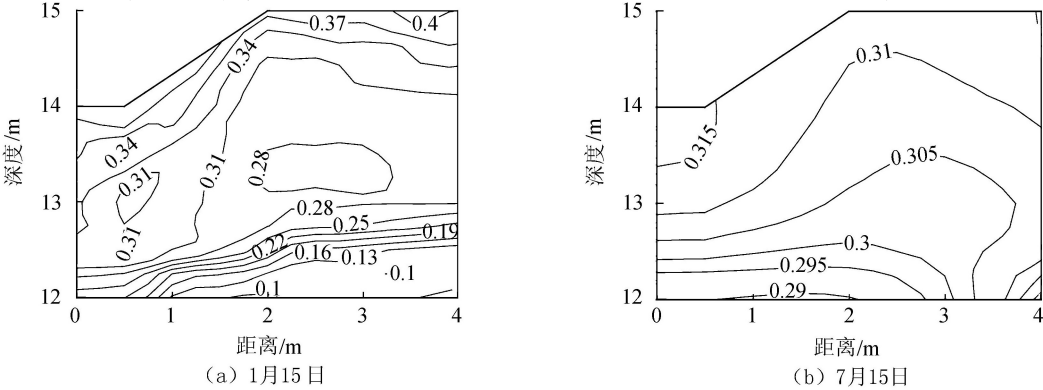


图3 常规渠道建成后第1年的体积含水量分布

Fig.3 Moisture distributions of the traditional channel in the first year after construction

29% ~30%),这是由于当聚冰区融化时,其下部土体仍然处于冻结状态,融化产生的水分无法及时从底部排出,于是就形成了饱和水层。这将导致渠坡表层的土体强度大大降低,容易引起渠坡发生滑动失稳破坏。

由于未考虑渠坡及地基表层的压坡及压重处理,从图 4(a)可以看出在冻结作用下,渠坡表面产生了显著的冻胀变形,渠坡土体往渠道方向移动,最大水平向位移为 16 mm,发生在渠坡顶部位置。由图 4(b)可以看到冻融循环后渠坡及地基产生的变形是不可逆的。由于内部土体仍然处于冻结状态,其水平位移仍然朝向渠道,渠坡表层土体由于解冻而产生融沉,其水平位移朝向渠坡土体内部,最大值为 1.9 mm,在 1/2 渠坡高度处。

由图 5 可知,修建渠道对地基内部的温度场有所影响。由图 6 可知,渠坡内土体冻结区域的水分场分布

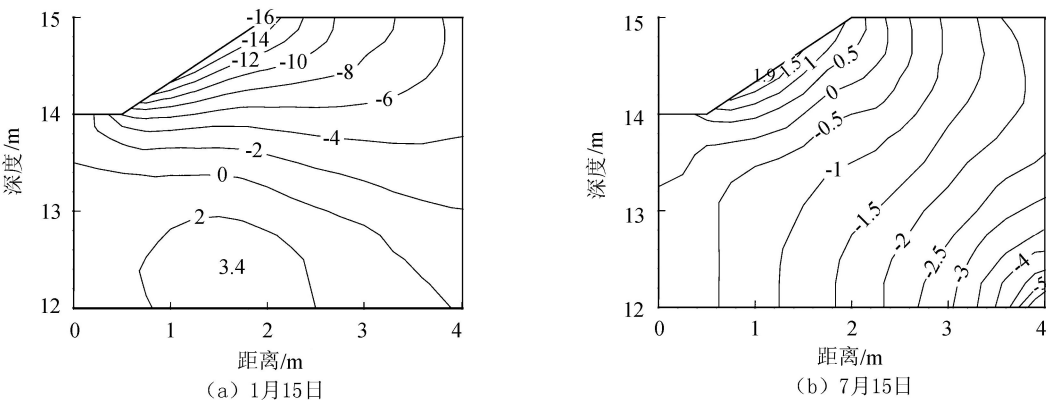


图 4 常规渠道建成后第 1 年的水平位移分布(单位:mm)

Fig. 4 Horizontal displacement distributions of the traditional channel in the first year after construction (Units: mm)

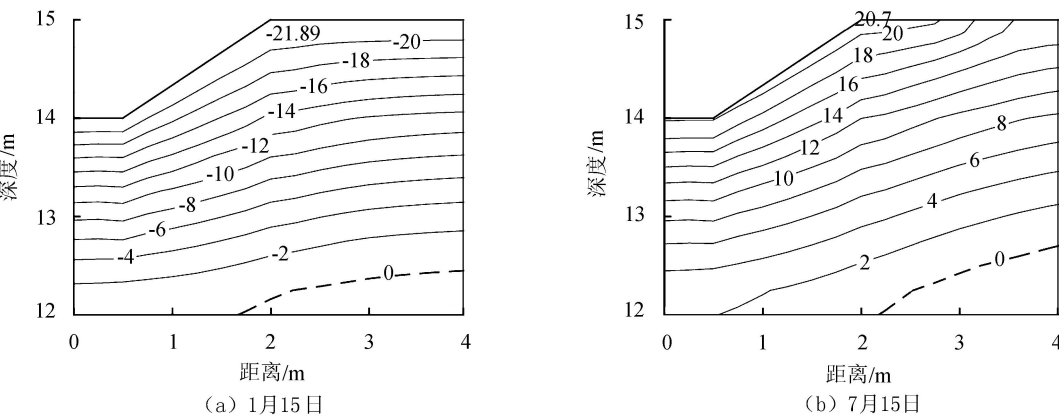


图 5 常规渠道建成后第 2 年的温度分布(单位:℃)

Fig. 5 Temperature distributions of the traditional channel in the second year after construction (Units: °C)

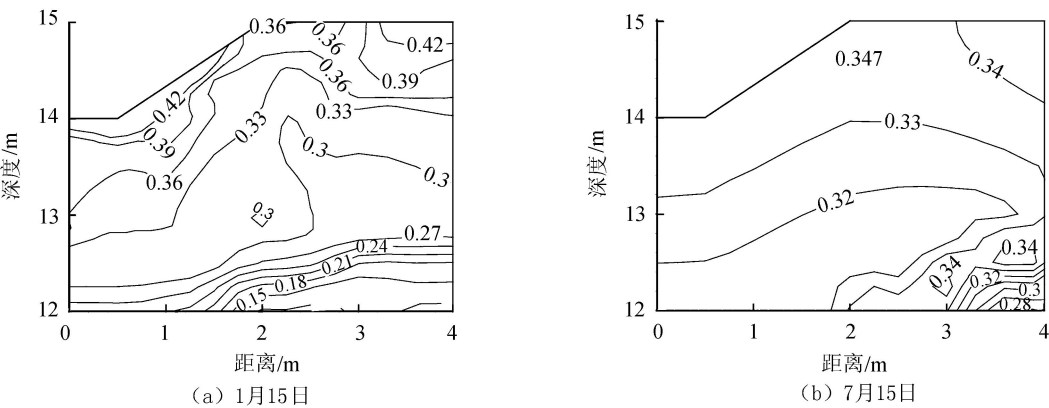


图 6 常规渠道建成后第 2 年的体积含水量分布

Fig. 6 Moisture distributions of the traditional channel in the second year after construction

规律与第1年基本接近,而体积含水量整体比第1年的大,最大体积含水量为42%,分布于渠坡和地表位置;冻区融化后,土体含水量基本均匀分布,约为34%;且解冻区的水分往土体内部冻结区迁移,导致内部冻结锋面附近含水量有所增大。

由图7可知,位移分布分布规律与渠道建成后第1年基本一致。其中,冻胀变形有所减小,融沉变形有所增大,如最大水平向冻胀变形降至14 mm,而最大水平向融沉变形则增大到2.9 mm。

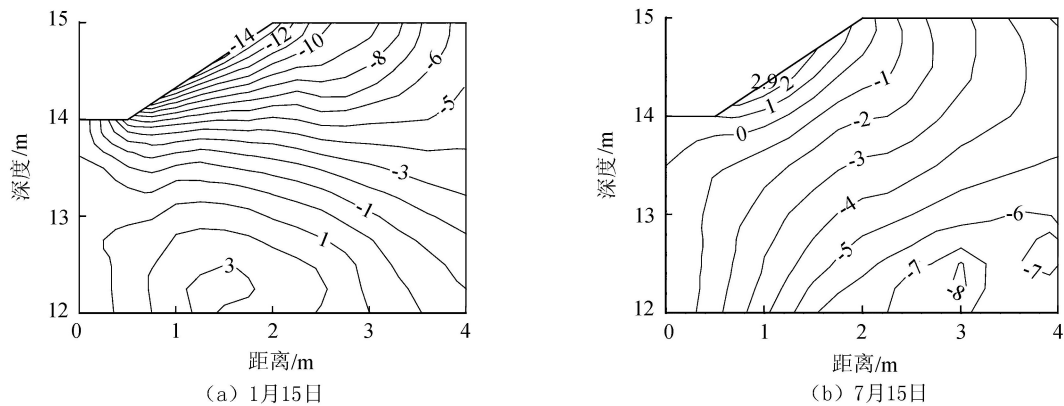


图7 常规渠道建成后第2年的水平位移分布(单位:mm)

Fig.7 Horizontal displacement distributions of the traditional channel in the second year after construction (Units: mm)

3.2.2 土工袋处理渠道

由图8可知,渠坡表层用土工袋处理后可有效减小地表温度往渠坡内部的传热速度。当渠坡建成后半年,渠底冻深为0.6 m,在1 m厚度的土工袋处理层内,而土工袋层下部土体的温度为4℃,比天然状态下同一深度处的温度升高了约14℃;当渠道运行1 a后(经历1次冻融循环),渠底土工袋层下部土体的温度仍然为4℃,且其余土工袋层底部位置处的土体温度变化幅度也较小,主要的温度变化发生在土工袋层以及表层未设土工袋的天然地基内部。由此可以认为,由于土工袋之间的导热性较差,土工袋处理渠道可减小其下土体的温度变化幅度,起到一定的保温作用,从而减小渠道发生冻胀和融沉破坏的可能性。

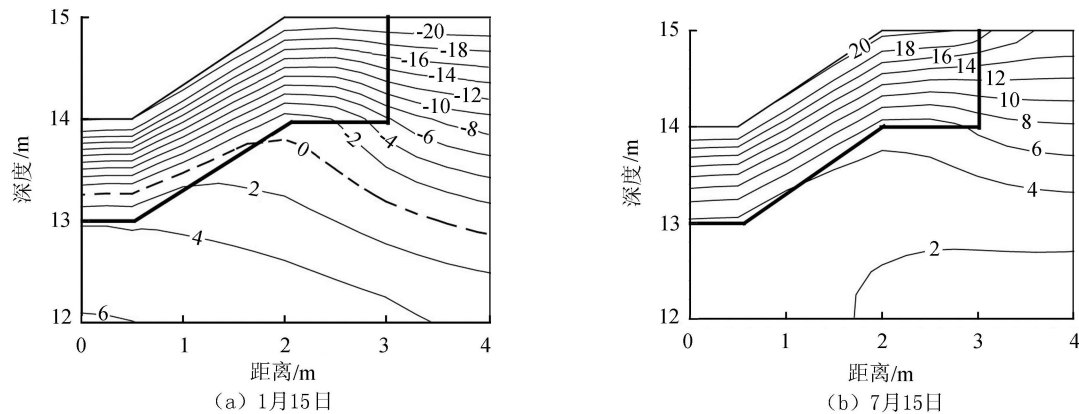


图8 土工袋处理渠道建成后第1年的温度分布(单位:℃)

Fig.8 Temperature distributions of the soilbag-treated channel in the first year after construction (Units: °C)

由图9可知,当外界温度达到最低时,土工袋层内体积含水量基本保持初始值25%不变,即土工袋之间未发生明显的水分迁移。此外,由于土工袋层的保温作用,其下土体内的水分迁移较未铺设土工袋层的情况明显减小,这主要是由于土工袋对土体内毛细水和薄膜水的上升具有一定的抑制作用。当外界温度到达一年内的最高温度后,土工袋层及下部土体的含水量变化较小,而未设土工袋层的天然地表以下土体融化后在土水势作用下往地基深处含水量较小区域迁移,从而导致地表附近含水量有所减小。

由图10可知,当土体冻结后渠坡的水平向位移朝向渠道,天然地基冻结产生的变形占主导作用,且最大位移主要集中在土工袋层,该位移由土工袋的冻结膨胀变形和土工袋后的天然地基冻结膨胀变形两部分叠

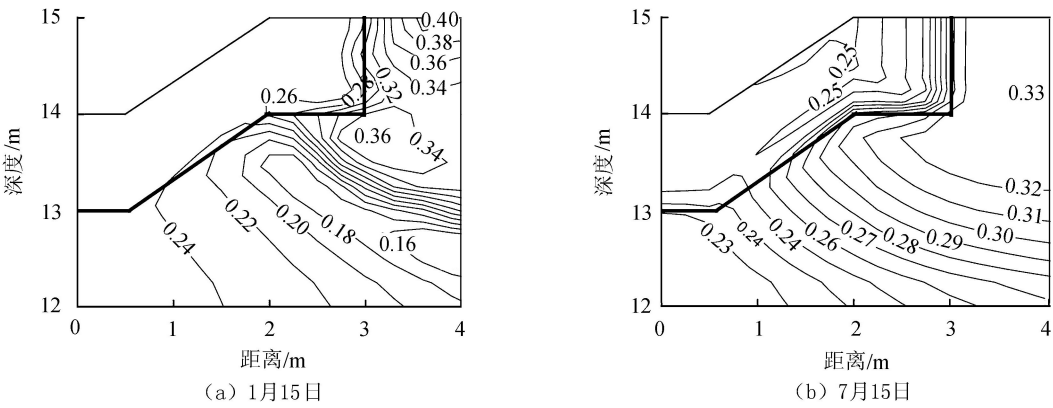


图 9 土工袋处理渠道建成后第 1 年的体积含水量分布

Fig. 9 Moisture distributions of the soilbag-treated channel in the first year after construction

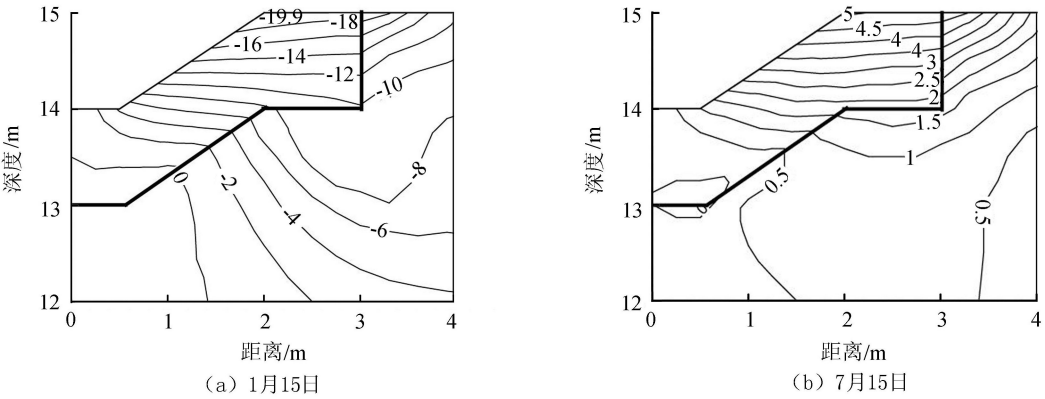


图 10 土工袋处理渠道建成后第 1 年的水平位移分布(单位:mm)

Fig. 10 Horizontal displacement distributions of the soilbag-treated channel in the first year after construction (Units: mm)

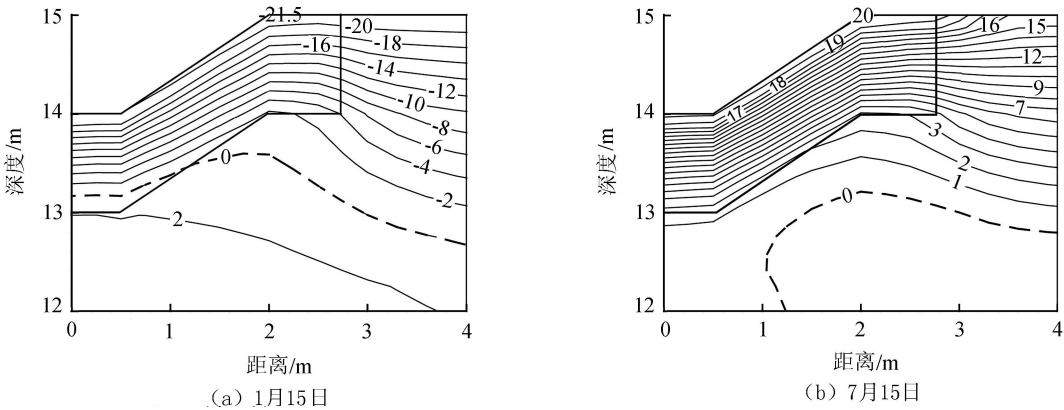


图 11 土工袋处理渠道建成后第 2 年的温度分布(单位:℃)

Fig. 11 Temperature distributions of the soilbag-treated channel in the second year after construction (Units: °C)

加而成,土工袋处理层后土体的水平变形量较小,在 2 ~ 8 mm 之间。随着气温逐渐升高,地基土体内的冻结冰开始融化,土体产生了融沉变形,水平位移朝向渠坡内部,其变化主要发生在土工袋层内,最大值为 5 mm。

图 11 为土工袋处理渠道建成后第 2 年 1 月 15 日和 7 月 15 日温度分布,可以看到渠道建成后第 2 年相比于第 1 年的同一时段有所变化,气温最低时段,土工袋处理层以下各等温线有所下降,而在气温最高时段则有所上升,由此说明修建渠道能够改变土体中的温度边界条件,且可以看出经过多年运行后,土工袋层以下的土体基本可以达到恒温冻结状态,不受外界气温变化的影响,从而使渠坡变形达到稳定状态。

图 12 为土工袋处理渠道建成后第 2 年 1 月 15 日和 7 月 15 日体积含水量分布,可以看到体积分含水量的分布规律与渠道建成后第 1 年的同一时刻基本一致。其中,冬季地下水在毛细力作用下往冻结区迁移并凝

结成冰,导致冻结区体积含水量较高;夏季表层土体中冻结冰融化,而内部土体仍然处于冻结状态,则融化出的自由水无法自由排出,使地基表层仍然处于高含水量状态,同时地基深处仍处于冻结状态,则表层部分融化水在凝结冰的抽吸力作用下往常年冻结盘方向迁移,使该区域形成常年冻结盘;土工袋层除了发生水分的相变之外基本不发生水分迁移,说明通过改变土工袋的水分扩散系数可以有效模拟土工袋对毛细水和薄膜水的抑制作用。由渠道建成后第2年的含水量分布可知,设有土工袋层的渠坡内含水量变化将趋于稳定。

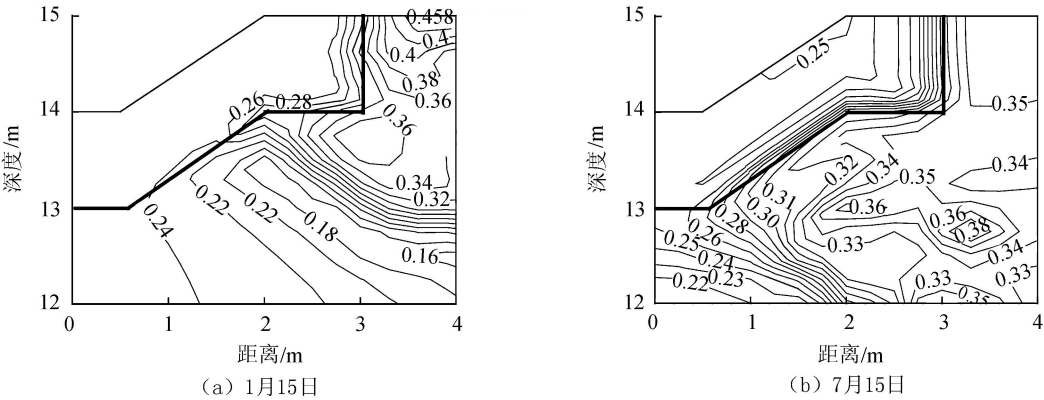


图 12 土工袋处理渠道建成后第 2 年的体积含水量分布

Fig. 12 Moisture distributions of the soilbag-treated channel in the second year after construction

由图 13 可以看到渠道运行第 2 年产生的冻胀、融沉变形均小于渠道建成后的第 1 年,且发生冻胀融沉变形的区域范围也明显减小,且主要集中在地基表层。

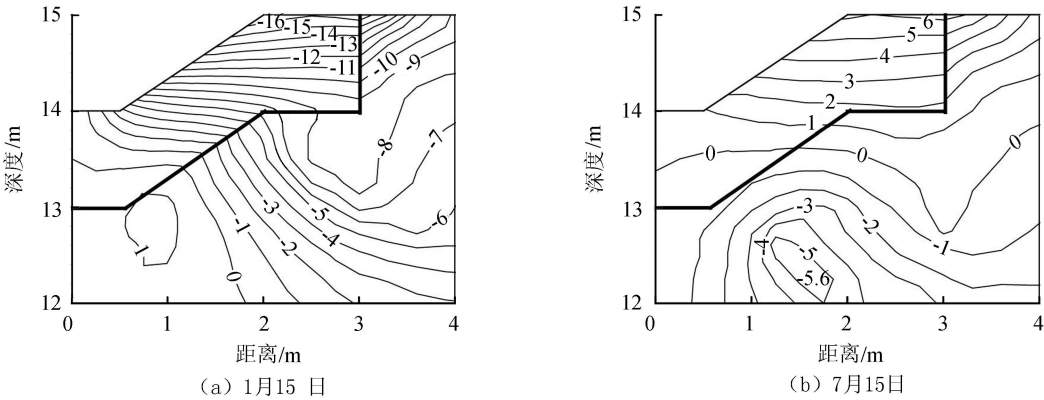


图 13 土工袋处理渠道建成后第 2 年的水平位移分布(单位:mm)

Fig. 13 Horizontal displacement distributions of the soilbag-treated channel in the second year after construction (Units: mm)

4 结 论

- a. 编制了水-热-力耦合模型的有限元计算程序,结合北方寒冷地区的渠道工程进行计算,进一步验证了水热力三场耦合计算的必要性,并分析了渠道建成后 2 年内 1 月 15 日和 7 月 15 日的渠坡温度场、水分场及位移的分布规律。
- b. 冬季温度逐渐下降时,渠坡土体自上而下开始冻结,且冻结冰锋面以下水分以毛细水和薄膜水的形式往冻结区迁移冻结成冰,由此导致冻结区含水量在地下水补给充足的情况下不断增大;在夏季温度逐渐升高时,渠坡中的冻土自上而下开始解冻,由于深处土体仍然处于冻结状态,渗透系数较小,导致融化的水无法往地基深处排出,因此渠坡融化区土体均处于饱水状态,这在外载作用下容易引起翻浆和渠坡失稳。
- c. 渠坡在周期性的气温变化过程中表现出显著的冻胀融沉变形特性,且冻胀和融沉变形是不可逆的,通常冻区融化产生的融沉值大于冻胀变形,且天然地基随着冻融循环次数的增加,冻胀变形有所减小而融沉变形有所增大,这主要是由冻土区和未冻土区不同的导热特性导致温度场的不可逆变化引起的,进一步说明了冻土中温度场、水分场和应力场之间的相互联系。

d. 土工袋处理渠道对冻土渠坡具有较好的防冻胀效果。土工袋较小的导热性可以有效减小渠坡内部土体温度受大气温度的影响,从而减小渠坡发生冻胀融沉变化的可能性;土工袋可以抑制毛细水和薄膜水的上升,可减小土工袋层及下部土体中的水分迁移,从而保持渠道内较为稳定的含水量,减小渠坡表层的冻胀量;土工袋具有一定的强度且在自身袋子张力作用下能够抑制部分冻胀变形,从而减小渠道衬砌体由冻胀引起的破坏。同时,渠道表层用土工袋处理后,渠坡内部温度可以较快达到稳定状态,运行 2 a 后可在地基 2 m 以下位置形成较为稳定的常年冻结层。

参考文献:

- [1] 陈肖柏,刘建坤,刘鸿绪,等. 土的冻结作用与地基[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [2] 徐学祖,王家澄,张立新,等. 土体冻胀和盐胀机理[M]. 北京:科学出版社, 1995.
- [3] 李卓,盛金保,刘斯宏,等. 土工袋防渠道冻胀模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1455-1463. (LI Zhuo, SHENG Jingbao, LIU Sihong, et al. Model tests on frost heave-prevented channels using soilbags[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1455-1463. (in Chinese))
- [4] 李卓,刘斯宏,王柳江,等. 冻融循环作用下土工袋冻胀量和融沉量试验[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2541-2545. (LI Zhuo, LIU Sihong, WANG Liujiang, et al. Experimental study of frost heave and thawing settlement of soilbags under different freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2541-2545. (in Chinese))
- [5] HARLAN R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil [J]. Water Resources Research, 1973, 9(5): 1314-1323.
- [6] TAYLOR G S, LUTHIN J N. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15: 548-555.
- [7] GUYMON G, BERG R, HROMADKA T. A one-dimensional frost heave model based upon simulation of simulations heat and water flux [J]. Cold Regions Science and Technology, 1980, 3(2/3): 253-263.
- [8] SHEN M, BRANKO L. Modelling of coupled heat, moisture and stress field in freezing soil [J]. Cold Regions Science and Technology, 1987, 14(3): 237-246.
- [9] LI Ning, CHEN Feixiong. The coupled heat-moisture-mechanic model of the frozen soil [J]. Cold Regions Science and Technology, 2000, 31(3): 199-205.
- [10] 陈飞熊, 李宁, 程国栋. 饱和正冻土多孔介质的理论框架[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 213-217. (CHEN Feixiong, LI Ning, CHENG Guodong. The theoretical frame of multi-phase porous medium for the freezing soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 213-217. (in Chinese))
- [11] 李宁,徐彬,陈飞熊. 冻土路基温度场、水分场、变形场三场耦合分析[J]. 中国公路学报, 2006, 19(3): 1-7. (LI Ning, XU Bin, CHEN Feixiong. Coupling analysis of temperature, deformation and stress field for frozen soil roadbed[J] China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(3): 1-7. (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分析[J]. 力学学报, 2001, 33(5): 621-629. (LI Hongsheng, LIU Zengli, LIANG Chengji. Mathematical model for coupled moisture heat and stress field and numerical simuation of frozen soil[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2001, 33(5): 621-629. (in Chinese))
- [13] 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.
- [14] 中科院兰州冰川冻土研究所. 冻土的温度水分应力及其相互作用[M]. 兰州:兰州大学出版社, 1989.
- [15] ZHANG M Y, LAI Y M, LIU Z Q, et al. Nonlinear analysis for the cooling effect of Qinghai-Tibetan railway embankment with different structures in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2005, 42(3): 237-249.
- [16] LAI Y M, WANG Q S, NIU F J, et al. Three-dimensional nonlinear analysis for temperature characteristic of ventilated embankment in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 38(2/3): 165-184.
- [17] LI D Q, WU Z W, FANG J H, et al. Heat stability analysis of embankment on the degrading permafrost district in the East of the Tibetan Plateau, China[J]. Cold Regions Science and Technology, 1998, 28(3): 183-188.
- [18] LI Zhuo, LIU Sihong, XU Guangru. Numerical study on the effect of frost heave prevention with different canal lining structures in seasonally frozen ground regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 85: 242-249.
- [19] LI Zhuo, LIU Sihong, WANG Liujiang. Experimental study on the effect frost heave prevention using soilbags[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 85: 109-116.
- [20] LAI Yuanming, MA Weidong, ZHANG Mingyi. Experimental investigation on influence of boundary conditions on cooling effect and mechanism of crushed-rock layers[J]. Cold Regions Science and Technology, 2006, 45(2): 114-121.