

季节冻土区衬砌渠道换填措施防冻胀数值模拟

王文杰¹, 王正中^{1,2*}, 李爽¹, 孙杲辰¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为了防治季节冻土区衬砌渠道的冻胀破坏, 对渠基易冻胀土体进行换填的防冻胀措施效果进行研究, 考虑实际边界条件, 建立浅层冻土相变温度场数学模型, 应用有限元软件对沈阳市浑北灌区渠道进行不同换填深度的热力耦合分析, 结果表明: 渠道阴坡、渠底、阳坡表面下 1.670 m、1.128 m、1.547 m 处为冻融活动区; 换填厚度与冻深近似呈正比关系; 随着换填深度的增加, 砼衬砌渠道的法向冻胀量减少; 渠道阴坡、阳坡及渠底的换填率分别为 53.9%、58.2%、79.8% 时, 砼衬砌板的法向位移分别减少 96.9%、95.54%、96.83%; 法向位移 0.6~0.7 cm, 在规范允许值(0.5~1.0 cm)内, 有效地消减了渠道的冻胀破坏, 可为工程换填优化设计提供理论参考。

关键词: 渠道衬砌; 相变温度场; 冻胀; 数值模拟; 换填法

中图分类号: S277; TV698.2+6 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2013)06-0083-07

Numerical simulation of anti-frozen heave by replace-filling measures for lined canal in seasonal frozen soil region

WANG Wen-jie¹, WANG Zheng-zhong^{1,2*}, LI Shuang¹, SUN Gao-chen¹

(1. College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to prevent the frost heave damage to lined channel in seasonal frozen soil region, carried out the research on the effect of anti-frozen heave measures by replacing frost heave sensitive soil in canal base. Considered the actual boundary condition, set up the mathematical model of phase transition temperature field in shallow frozen soil. Carried out the coupled heat-stress analysis of different filling depths by using FEM. The results revealed that: Under the ground of shady canal slope, canal bottom and surface of sunny slope at 1.670 m, 1.128 m and 1.547 m, here, was the active zone of freezing and thawing. The replacing soil depth closely was submitted a positive correlations with the frozen depth. It also shown that with increasing the replacement depth, the normal vitical frozen heave of the concrete lined channel will be reduced. When the replace-filling rates in channel shady slope, bottom and sunny slope were 53.9%, 58.2% and 79.8% respectively, the normal displacements of concrete lining were decreased by 96.9%, 95.54% and 96.83%. Also the normal displacement was 0.6~0.7 cm which was remained within the standar accepted value as 0.5~1.0 cm. This measures can be effectively alleviated the frozen heave damage of channels and provided a theoretic reference for optimal design of the replace-filling in engineering practices.

Keywords: lined canal; phase transition temperature field; frozen heave; numerical simulation; replace-filling method

北方灌区是我国粮食和经济作物的主要生产基地, 渠道是灌区主要输水系统。渠道衬砌不仅能有

收稿日期: 2013-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助(51279168); 国家科技支撑计划资助(2012BAD10B02); 冻土工程国家重点实验室项目资助(SKLFSE-201105); 博士点基金(20120204110024); 陕西水利科技专项(SXSL2011-03)

作者简介: 王文杰(1988—), 女, 陕西延安人, 硕士, 主要研究方向为水工程安全、病害防治理论与技术。E-mail: wangwenjie063@163.com。

* 通信作者: 王正中(1963—), 男, 陕西彬县人, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构工程方面教学和科研工作。E-mail: wangzz0910@163.com。

效减少渠道输水渗漏损失,大幅度提高渠系水的利用系数,而且可以显著提高渠道运行的安全性和输水效率,是灌区节水改造工程建设的主要内容。然而在西北、东北、华北等广大地区,由于冬季气候寒冷,渠道衬砌工程普遍存在冻胀破坏。由于严重的冻害问题,使渠道防渗衬砌工程缩短了使用寿命、降低了防渗效益、增大了管理维修工作的难度和费用,也使输水系统渗漏损失接近 50%,输水的渗漏惊人,甚至使渠道发生滑塌事故,直接影响着工程效益的发挥及安全运行。因此探究冻土地区渠道冻胀破坏机理及防冻胀措施对节水灌溉有非常重要的意义^[1-2]。

目前渠道防冻胀主要有两种方法^[3]:(1) 保温法,即通过保温隔热材料达到抗冻胀的效果^[4-5];(2) 换填法,即在冻结深度内将衬砌板下的冻胀性土换成非冻胀性土,常采用铺设砂砾石垫层。两种方法相比,前者工程造价较高,耗资较大,后者则需要当地有丰富的砂砾换填料。以往许多学者^[6-8]对换填法进行了研究,但对换填防冻层这一工程措施的研究大多是基于工程的需要,尚停留在经验和定性分析的层面,未建立一种成熟的、定量的理论方法,以对换填防冻层这一工程措施的效果进行系统的评价研究。

寒区工程问题的研究特点在于必须考虑寒冷地区恶劣的气候条件。本文综合考虑辐射、蒸发、气温、风速等实际边界条件,建立浅层冻土伴有相变温度场的数学模型,以此计算冻土渠基随气候冻融变化过程中的温度场分布,不同时期的温度场变化可以反映出冻结相变区的变化,然后采用线弹性冻胀计算模型来近似考虑土体体积力和土体冻结相变产生的膨胀力,分析换填前及不同换填深度渠基冻胀变形的规律,对换填法防冻胀的实际效果进行评价。

1 力学模型的建立

基于热弹性理论,应用有限元法对季节冻土区渠基的冻胀变形特征进行计算分析。考虑到变形场对温度场的影响较小,研究中采用温度场和变形场的顺序耦合分析方法,分为两个部分对其进行研究:(1) 温度场数值分析;(2) 变形场和应力场数值分析。

1.1 基本假设

渠道基土冻结时,土体、水和冰之间相互作用的微观结构及动态过程相当复杂,目前很难准确模拟。

根据现场及室内试验研究,为便于分析及抓住影响冻结过程和冻胀变形的主要特征,对其进行恰当简化:

(1) 假设冻土是均匀连续各向同性体。

(2) 尽管土的冻胀与其温度、水分、土质密切相关,对具体工程当水分及土壤条件确定时土体最终冻胀主要取决于温度,暂不考虑土冻结过程中水分迁移过程。

(3) 假定相变温度在同一种土中和同种外力条件下为常值,即暂取相变温度为 0℃^[9]。

(4) 忽略沿渠道长度方向的温度差异,把衬砌渠道的温度变化作为平面问题处理。

1.2 热传导方程

考虑土骨架和水的热传导、冰水相变而忽略热对流及其它作用,渠基温度场的分布可用如下伴有相变问题的二维热传导微分方程描述:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}) \quad (1)$$

式中, ρ 为渠基土的密度; λ_x 、 λ_y 为基土沿 x 、 y 向的导热系数; C 为等效比热; T 为渠基土的温度; t 为时间。

1.3 本构方程

冻胀是由于土壤中水分在低温下冻结引起的。如果基土中各点是自由的,则当温度低于冻结温度时便发生冻胀变形,只产生正应变;如为各向同性材料,则正应变在各个方向都相同,便不会产生剪应变。事实上冻土冻胀会受到衬砌板的约束,使冻土各部分之间也会相互制约,从而产生应力。根据文献^[10],可将冻土的冻胀视为冷胀热缩,量化为与温度对应的热膨胀系数,只有温度低于相变温度时土体才膨胀。

与温度相关的应力-应变方程为:

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y) + \alpha (T - T_0) \quad (2)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \sigma_x) + \alpha (T - T_0) \quad (3)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy} \quad (4)$$

式中, ϵ_x 、 ϵ_y 为正应变, γ_{xy} 为剪应变, σ_x 、 σ_y 为正应力, τ_{xy} 为剪应力, E 为弹性模量, T 为当前温度, T_0 为初始温度, ν 为泊松比, α 为线膨胀系数。

2 有限元模型及求解

2.1 渠道概况

以东北某一输水干渠的梯形渠道为例进行计

算,该干渠地处东北中部山前平原重度深季节冻土区,浅层的黏质黄土是冻胀敏感性土,当地拥有丰富的砂砾土,拟采用粉黏粒含量不超过 5% 的砂砾土作为渠基的换填土。渠道衬砌的换填深度,依据当地冻深、土质、地下水位、向阳背阳和衬砌的结构形式等具体确定^[11]。原型渠道的设计冻深为 1.5 m,混凝土衬砌板厚度为 0.1 m,根据 GB/T50600-2010

《渠道防渗工程技术规范》,渠底换填比为 70%~80%,坡板上部为 50%~70%,换填比 = (防渗层厚度 + 换填层厚度) × 100% / 工程设计冻深,渠底和渠坡的理论换填厚度为 65~110 cm。本文按照换填 30、40、50、60、70、80 cm 和无换填层七种情况分别进行建模。不同换填方案区别只是换填土层厚度不同,换填 80 cm 的模型如图 1 所示。

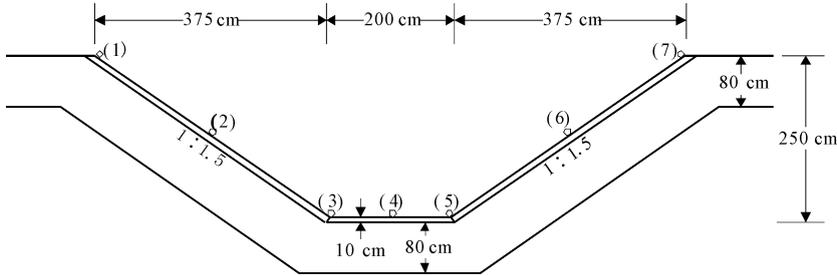


图 1 换填 80 cm 渠道模型示意图

Fig. 1 Illustration of canal section of 80 cm replacement

2.2 有限元模型

采用有限元软件 Comsol Mutiphysics 对渠道进行热力耦合的模拟计算,将渠基土和砼衬砌板作为一个整体进行分析,衬砌板两坡脚设置接缝,采用小弹性模量的材料模拟伸缩缝。换填方案与无换填方案建模相同,只是换填区域所对应土质的热力学参数不同。参照现场实际情况,计算模型中基础从渠顶向下取 10 m,左右边界取 0.75 m。采用四边形单元划分网格,该模型共划分单元 2 890 个,无换填方案的有限元模型如图 2 所示。

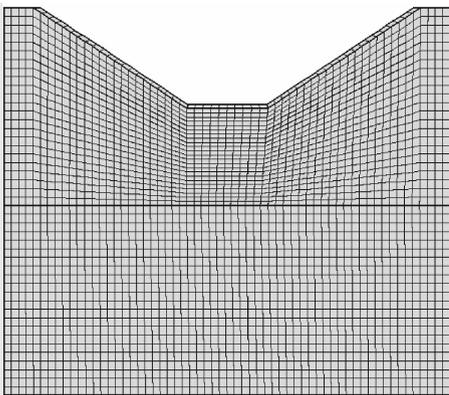


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

2.3 边界条件及初始条件

根据当地气象观测资料及附面层原理^[12],不考虑升温效应,渠道上边界温度条件可以表示为:

$$T = T_b + \Delta T + A \sin\left(\frac{2\pi t}{8760} + \frac{\pi}{2}\right) \quad (5)$$

式中, T_b 为年平均气温,根据当地气象站观测资料,取为 5.5℃; ΔT 为附面层总增温量,依据青藏高原附面层理论的研究结果,附面层增温在 2.5℃~6.5℃ 之间,鉴于东北辐射较青藏高原小,并依据渠道不同位置的负积温,附面层总增温量渠道阴坡、渠底与阳坡分别取 1℃、2.5℃、3.6℃; A 为上边界年温度变化振幅,取为 21.5℃; $\pi/2$ 为初始计算相位。

渠道左右边界取为绝热边界条件。依据恒温层原理^[13]和渠道所在区域的气象条件及土壤情况,下边界温度取为 10℃。初始条件以天然地面为上边界反复计算直至得到稳定的温度场为止,以此时的温度值作为天然地面下的初始温度。

进行应力分析时,模型的上表面为自由边界,左右为水平位移约束,下边界为竖向位移约束。

2.4 土层计算参数

参考有关资料^[14],计算中各土质的热物理参数见表 1。根据不同温度区间内土中未冻水含量,考虑水相变潜热计算得到各土质的等效比热,见表 2。参考文献^[15]衬砌混凝土导热系数为 1.58 W·m⁻¹·K⁻¹,比热为 1004 J·kg⁻¹·K⁻¹。研究表明,冻土的弹性模量、泊松比均为土温的函数,根据当地渠基的土质及换填料砂砾土的土质参考文献^[16]得各土体的力学参数,具体数值见表 3。关于冻土的线膨胀系数的取值,考虑土体冻胀的主要因素为地下水位的距离及负温值,将冻胀系数 α 取为随竖直坐标和温度同时变化的冻胀率;砂砾换填土冻胀性小,计算过程中不考虑其冻胀性,冻胀系数取为 0。

表 1 土体热物理参数

Table 1 Thermodynamic parameters of soils

材料 Material	干容重 Dry density ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	含水量 Water content /%	导热系数/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)		比热/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	
			Heat conductivity		Specific heat	
			冻土 Frozen soil	融土 Thawed soil	冻土 Frozen soil	融土 Thawed soil
砂砾 Gravel soil	2060	6	1.4	1.15	706.6	861.7
黏质黄土 Loess	1540	25	1.58	1.127	1158	1466

表 2 不同温度区间土体的等效比热

Table 2 Equivalent specific heat capacity of soils of different temperature range

材料 Material	温度区间 Temperature range/ $^{\circ}\text{C}$								
	20~0	0~-0.2	-0.2~-0.5	-0.5~-1	-1~-2	-2~-3	-3~-5	-5~-10	-10~-20
砂砾土 Gravel soil	861.7	62405	9060	3497	2156	1004	937.5	820.2	706.6
黏质黄土 Loess	1466	68372	37137	12142	6758	6727	2650	1693	1158

表 3 土体力学参数

Table 3 Mechanics parameters of soils

材料 Material	力学参数 Mechanical parameter	温度 Temperature/ $^{\circ}\text{C}$							
		-20	-10	-5	-2	-1	-0.05	0	20
砂砾土 Gravel soil	弹性模量 Elastic modulus/MPa	380.8	272.0	200.2	141.3	114.0	69.8	61.0	61.0
	泊松比 Poisson ratio	0.21	0.28	0.32	0.34	0.34	0.35	0.35	0.35
黏质黄土 Loess	弹性模量 Elastic modulus/MPa	190.9	135.5	98.9	68.9	55.0	32.5	28.0	28.0
	泊松比 Poisson ratio	0.24	0.32	0.36	0.38	0.39	0.40	0.40	0.40

3 计算结果分析

3.1 温度场分析

北方季节性冻土区的冻结时间大概为每年 11 月至次年 3 月,图 3 为无换填方案 11 月 30 日到次年 4 月 30 日逐月温度场分布图,图 3(1) - (6)代表各月渠基的温度场分布。由于渠基土下边界附近等温线几乎为水平直线,为了突出不同时刻的区别,只显示了渠顶地表下 5 m 内的结果。从图 3 可知,温度场分布随着时间及地表温度的变化而改变,零度等温线即冻结锋面,随着气温的降低,由渠基表面向下推移,到 3 月份到达最大冻结深度。从 3 月底开始,气温升高,渠道表面开始出现正温,冻土体双向融化,直到季节冻土层完全消失。图 3(2)的冻结锋面下降快,后面下降速度减缓一些,是由于负温梯度影响冻结速率,12 月底地表温度低,恒温层温度维持不变,造成基土负温梯度大,增大冻结速率。整个冻融过程中渠道的季节冻结深度阴坡为 1.670 m、渠底为 1.128 m、阳坡为 1.547 m,此深度以上为冻

融活动区,也是冬季渠基土冻胀的主要区域,换填防冻处理中应特别注意改善这部分土体的土质,避免采用强冻胀性的土。计算所得的冻结深度与设计冻深接近,说明非稳态相变温度场的计算可以反映实际情况。

不同换填深度的等温线分布与无换填分布类似,由于砂砾石比黏质黄土导热系数大、比热小,换填后的渠基冻结锋面,即 0°C 等温线下降快,随着气温的回升,换填后的渠基温度回升也快,冻融区域比无换填的情况大;换填厚度越大,总冻深越大,即换填厚度与冻深近似成正比关系。

3.2 冻胀量分析

不同方案阴坡中点法向冻胀量随时间变化图见图 4,在外界条件相同的情况下,各方案冻胀量分布趋势类似,随着气温的降低,渠基土冻胀,法向冻胀量增大,大概在 3 月底或 4 月初出现峰值。对不同换填深度进行比较,可以看出,随着换填深度的增加,砼衬砌板法向冻胀量减少。

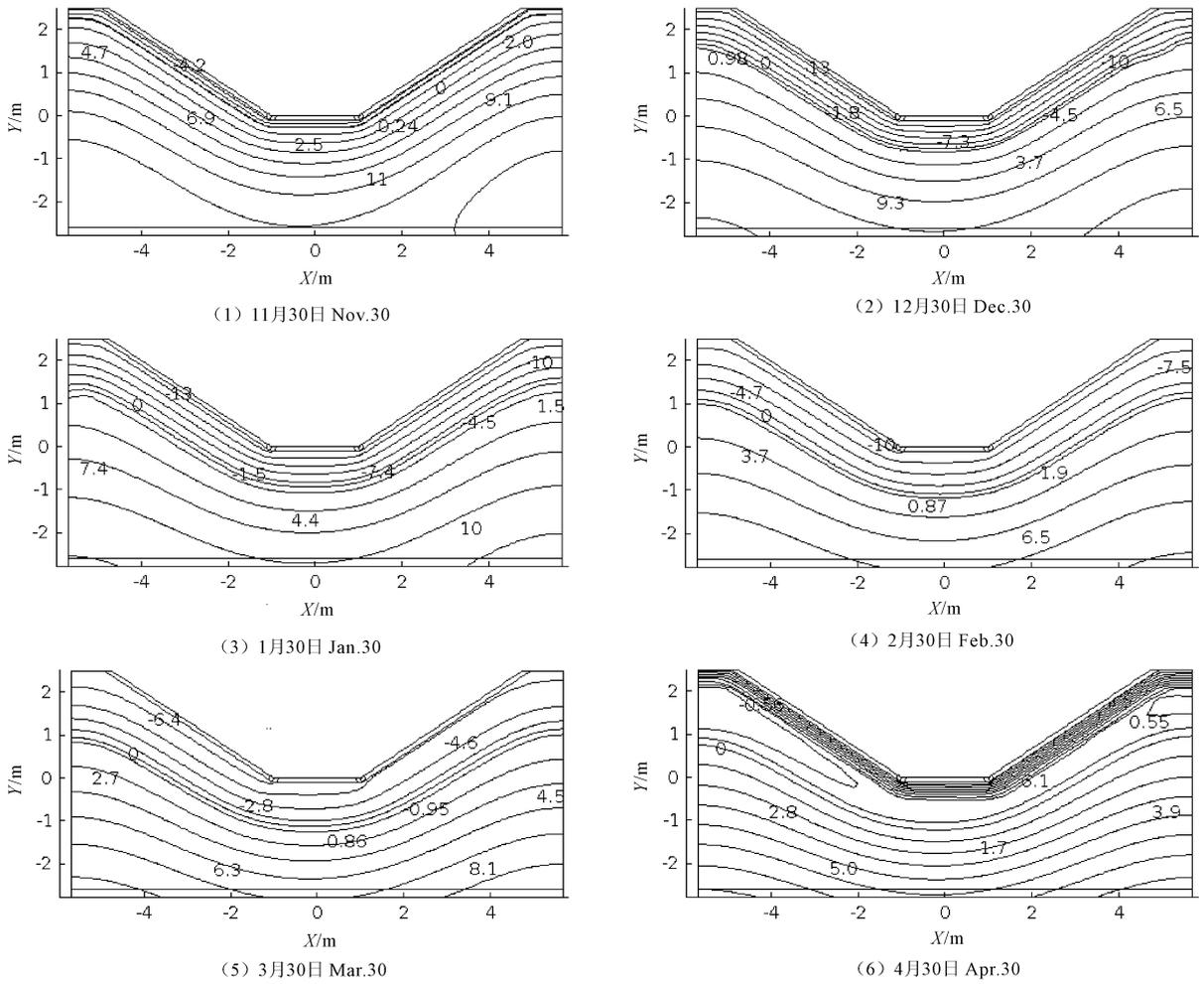
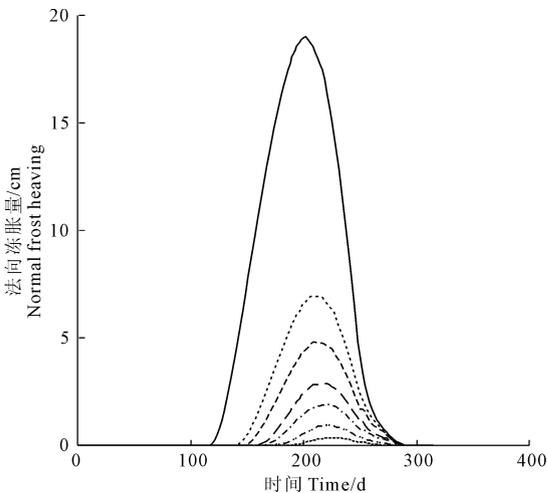


图3 冻土渠基各时期温度场分布

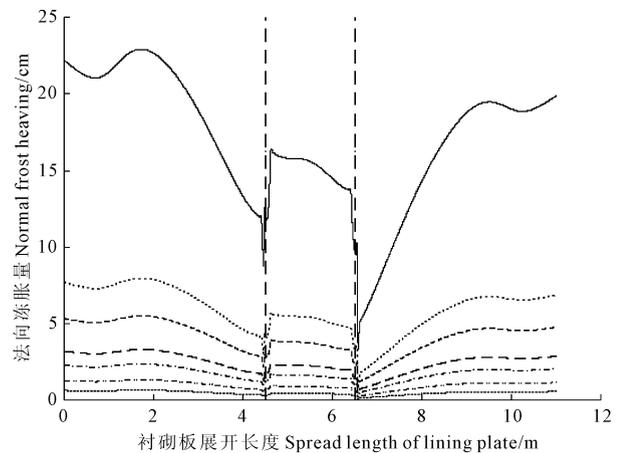
Fig.3 Distribution of temperature field of frozen soil in canal base at various period



- 无换填 Without replacement
- - - 换填30cm Replacement 30cm
- - - 换填40cm Replacement 40cm
- - - 换填50cm Replacement 50cm
- - - 换填60cm Replacement 60cm
- - - 换填70cm Replacement 70cm
- - - 换填80cm Replacement 80cm

图4 阴坡中点法向冻胀量随时间变化图

Fig.4 Normal frost heaving quantity vs time at the middle of shady slope



- 无换填 Without replacement
- - - 换填30cm Replacement 30cm
- - - 换填40cm Replacement 40cm
- - - 换填50cm Replacement 50cm
- - - 换填60cm Replacement 60cm
- - - 换填70cm Replacement 70cm
- - - 换填80cm Replacement 80cm

图5 不同换填深度法向冻胀量对比图

Fig.5 Comparison of normal frost heaving quantity for different replacements

大约在 3 月末渠基土冻胀强度最大,该时段不同换填深度法向冻胀沿衬砌板展开分布图见图 5,图中垂直辅助线用于区分渠坡与底板,从左往右依次为阴坡、渠底、阳坡。由图 5 可知:(1) 无换填时法向冻胀量分布,阴坡最大,阳坡次之,渠底最小;(2) 坡脚处渠基土冻胀受底板和坡板的双向约束,导致坡脚处法向冻胀量小;底板受到两坡板的约束,冻胀变形中部大两边小;(3) 不同换填深度法向冻

胀量分布较无换填时整体减小,分布更加均匀,其原因是换填土砂砾石无冻胀性。原渠基土为黏质黄土,其冻胀性强,换填 30 cm 后明显降低冻胀量,起到一定的防治衬砌渠道冻胀的作用。

为了直观地显示衬砌板全断面冻胀量分布情况,沿着衬砌板选取 7 个点,如图 1 所示。表 4 为 3 月底不同方案各点的最大法向冻胀量及减小幅度对比值。

表 4 不同换填深度下的法向冻胀量及减小幅度

Table 4 Normal frost heaving quantity and decrease by different replacements

点号 Points	无换填 Without replacement/cm	30 cm		40 cm		50 cm		60 cm		70 cm		80 cm	
		/cm	/%										
1	21.5	7.8	63.72	5.4	74.88	3.2	85.12	2.1	90.23	1.3	93.95	0.7	96.74
2	22.6	8.0	64.60	5.6	75.22	3.9	82.74	2.4	89.38	1.3	94.25	0.7	96.90
3	11.9	7.7	35.29	5.3	55.46	3.4	71.43	2.3	80.67	1.2	89.92	0.7	94.12
4	15.7	7.8	50.32	5.4	65.61	3.0	80.89	2.4	84.71	1.3	91.72	0.7	95.54
5	9.8	6.7	31.63	4.4	55.10	3.0	69.39	2.1	78.57	1.0	89.80	0.6	93.88
6	18.9	6.9	63.49	4.8	74.60	3.0	84.13	1.9	89.95	1.0	94.71	0.6	96.83
7	16.5	6.6	60.00	4.7	71.52	2.9	82.42	1.8	89.09	1.0	93.94	0.6	96.36

从表 4 可知,换填 30、40、50、60、70、80 cm 最大法向冻胀量分别平均消减 52.72%、67.48%、79.45%、86.09%、92.61%、95.77%。随着换填深度的增加,法向冻胀量逐渐减小,但是减小的幅度也在减小。换填 80cm 时,即阴坡、渠底、阳坡换填比分别为 53.9%、79.8%、58.2%,渠道法向冻胀量各点分布大致相等,避免渠道不均匀冻胀变形;依据规范^[17]砼梯形渠道允许法向位移值是 0.5~1.0 cm,换填 80 cm 后最大法向冻胀量是 0.7 cm,满足设计要求,有效地避免砼衬砌渠道因冻胀不均的破坏,因此换填 80 cm 是最佳选择。对渠道不同位置的数据统计分析后,获得换填后的最大法向冻胀量与换填比的对应关系见图 6,可为类似工程换填深度的确定提供参考。

4 结论与讨论

1) 通过合理的假设与简化,综合考虑太阳辐射、蒸发、气温、风速等影响渠道砼衬砌冻胀的外界因素,建立浅层冻土伴有相变温度场的数学模型。采用这一模型,可以计算冻土渠基随气候变化过程中的温度场分布,不同时期的温度场变化可以反映出冻结相变区的变化规律。计算得到渠道阴坡、渠底、阳坡表面下 1.670 m、1.128 m、1.547 m 为冻融活动区,是诱发渠道土体冻胀的主要因素,在换填处理中应特别注意改善这部分土质。计算所得的冻结深度与设计冻深接近,说明非稳态相变温度场的计算

符合实际情况。

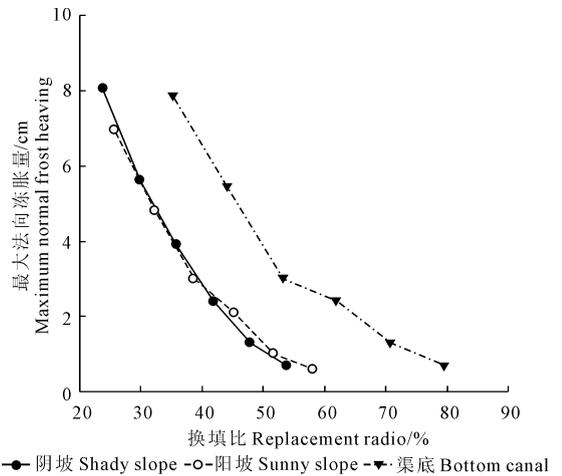


图 6 渠道不同位置最大法向冻胀量与换填比的关系图

Fig.6 Maximum normal frost heaving vs replacement ratio at the different canal locations

2) 利用所建立的含相变的温度场与应力场耦合的数学模型,对换填法渠道抗冻胀措施进行了数值模拟研究,结果表明:换填厚度与冻深近似成正比关系;随着气温的变化,在 3 月底砼衬砌渠道出现最大冻深,渠道冻胀变形最为剧烈;换填深度的增加使砼衬砌渠道的法向冻胀量减少,换填 30、40、50、60、70、80 cm 最大法向冻胀量分别消减 52.72%、67.48%、79.45%、86.09%、92.61%、95.77%;换填 80 cm 后使砼衬砌板法向冻胀位移在规范冻胀允许范

围内,可为工程换填优化设计提供参考;换填方案有效地消减了渠道衬砌板冻胀变形的不均匀,随着换填深度的增加,衬砌板整体变形逐渐一致,大大减少了渠道衬砌因冻胀变形分布不一致的破坏。

3) 本文计算对工程实际应用提供参考,换填时应严格控制砂砾石土中粉黏粒的含量,尽量保证换填料中粉黏粒含量小于 5%。为了防止渠道中泥土进入换填垫层,可在砼衬砌板下铺设一层无纺布,以起到反滤和防止水流挟带粘土颗粒进入砂砾石垫层,以确保砂砾石换填处理的防冻效果和使用寿命。

参 考 文 献:

- [1] 李安国.我国渠道防渗工程技术综述[J].防渗技术,2000,6(1):1-4,16.
- [2] 何武全.我国渠道防渗工程技术的发展现状与研究方向[J].防渗工程,2002,8(1):31-33,46.
- [3] 张 茹,王正中.季节性冻土地区衬砌渠道冻胀防治技术研究进展[J].干旱地区农业研究,2007,25(3):236-240.
- [4] 程满金,申利刚,步丰湖,等.聚苯乙烯保温板在衬砌渠道防冻胀中的应用研究[J].灌溉排水学报,2011,30(5):22-27.
- [5] 申利刚,程满金,杨宏志,等.渠道衬砌铺设聚苯乙烯板保温防冻害试验研究[J].内蒙古水利,2001,(3):12-14,29.
- [6] 朱 强,付思宁,武福学.砂-砾换填基防治渠道冻胀的研究[J].冰川冻土,1988,10(4):400-408.

- [7] 朱达夫,林素馨.混凝土衬砌渠道用风积砂作防冻胀垫层的探讨[J].冰川冻土,1986,8(3):239-244.
- [8] 申利刚,张海生,白雪英,等.衬砌渠道换填风积砂防冻胀试验研究[J].内蒙古水利,2001,(2):29-30.
- [9] 王正中,刘旭东,陈立杰,等.刚性衬砌渠道不同纵缝削减冻胀效果的数值模拟[J].农业工程学报,2009,25(11):1-7.
- [10] 王正中,沙际德,蒋允静,等.正交各向异性冻土与建筑物相互作用的非线性有限元分析[J].土木工程学报,1999,32(3):55-60.
- [11] 童长江,管枫年.土的冻胀与建筑物冻害防治[M].北京:水利电力出版社,1985.
- [12] 朱临楠.高原冻土区不同下垫面的附面层研究[J].冰川冻土,1988,10(1):8-14.
- [13] 刘晓燕,赵 军,石 成,等.土壤恒温层温度及深度研究[J].太阳能学报,2007,28(5):494-498.
- [14] 徐学祖,陶兆祥,傅素兰.典型融冻土的热学性质[C]//中国科学院兰州冻土研究所集刊编辑委员会.中国科学院兰州冰川冻土沙漠所集刊(第 2 号),北京:科学出版社,1981:104-112.
- [15] 张 洁,徐 伟,钟建驰.润扬大桥南锚碇超深基坑围护冻结法施工温度场全过程的数值模拟[J].建筑施工,2004,26(1):15-17.
- [16] 安维东,吴紫汪,马 巍.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.
- [17] 中华人民共和国水利部.《渠系工程抗冻胀设计规范》(SL23-2006)[S].北京:中国水利水电出版社,2006.

(上接第 82 页)

(3) 对于进口和喉部管径相同的文丘里施肥器,若喉部两端收缩比和放大比不同,即局部水头损失系数 ξ_1 和 ξ_2 不同,当压力水流通过时,其喉部产生的负压达到最小值时所需的进口压力不同。局部水头损失系数越大,则其达到最小负压值时所需的进口压力将越高。

本文主要从水力学原理出发,研究了文丘里施肥器进出口压力、喉部流速和喉部两端局部水头损失系数对喉部负压的产生及变化影响,并未涉及结构参数,如喉部两端收缩比和放大比对喉部负压的影响研究,所得相关结论均为文丘里施肥器试验测定所得,对于文丘里施肥器的相关工作条件,如压力条件、流量条件,还需在实际应用中进一步试验验证。建议在文丘里施肥器的结构设计中,充分考虑喉部两端收缩比和放大比与局部水头损失系数的关系确定合理的设计参数;针对已经选定的文丘里施肥器,结合进出口压力、流速与喉部负压的关系,配置相关滴灌工作条件。

参 考 文 献:

- [1] 李久生,张建君,薛克宗.滴灌施肥灌溉原理与应用[M].北京:

- 中国农业科学技术出版社,2003:16-20.
- [2] 王 淼,黄兴法,李光永.文丘里施肥器性能数值模拟研究[J].农业工程学报,2006,(7):27-31.
- [3] 严海军,初晓一.喉管直径对文丘里施肥器性能影响的数值模拟[J].排灌机械工程学报,2011,(4):359-363.
- [4] 陈作炳,豆海建,陈思维,等.文丘里管流场的数值研究[J].中国水泥,2005,(4):58-60.
- [5] 邱振宇,鲍安红.施肥器结构参数对施肥浓度影响的数值研究[J].农机化研究,2012,(4):42-45.
- [6] 孟庆国.文丘里施肥器改进设计和应用[J].现代农业装备,2005,(22):97-98.
- [7] 金永奎,夏春华,方部玲.文丘里施肥器系列的研制[J].中国农村水利水电,2006,(5):14-16.
- [8] 孙艳琦,牛文全.文丘里管结构参数对其水力性能的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(2):211-218.
- [9] 严海军,初晓一,王 敏,等.微灌系统文丘里施肥器吸肥性能试验[J].排灌机械工程学报,2010,(3):251-255.
- [10] 冯瑞珏,洪添胜,李家念,等.文丘里施肥器控制试验分析[J].灌溉排水学报,2011,(12):11-14.
- [11] 李加念,洪添胜,冯瑞珏,等.基于脉宽调制的文丘里变量施肥装置设计与试验[J].农业工程学报,2012,28(8):105-110.
- [12] 李家星,赵振兴.水力学(上)[M].南京:河海大学出版社,2001.
- [13] 张也影.流体力学[M].北京:北京教育出版社,1992.