

基于 TCR 传热原理的混凝土复合保温衬砌渠道防冻胀效果研究

郭 瑞¹, 王正中^{1,2*}, 牛永红², 刘铨鸿¹, 王 羿¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 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, 兰州 730000)

摘 要: 中国北方寒冷地区广泛采用保温措施进行渠道防冻胀, 在苯板保温防冻胀设计中铺设厚度一般根据半理论半经验确定, 并没有考虑衬砌板与保温板接触热阻及交错布置对保温性能与削减冻胀的影响。该文依据固体材料接触热阻 (thermal contact resistance, TCR) 原理与压力相关的传热本构模型, 提出了混凝土复合保温衬砌新形式。通过 ABAQUS 有限元软件采用热力耦合模拟将其与普通型式的苯板保温渠道进行比较。结果表明: 与普通保温衬砌渠道相比, 外界负温时, 复合保温衬砌的保温及消减冻胀力效果显著。理论上复合保温衬砌冻胀量消减 40% 以上, 法向冻胀力减少 66%, 切向冻胀力减小 58%。对寒区衬砌渠道保温防冻胀设计提供了相应的理论参考。

关键词: 混凝土衬砌; 保温; 模型; EPS 保温板; TCR; 复合保温; 防冻胀

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.20.015

中图分类号: TV698.2⁺6

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-20-0101-06

郭 瑞, 王正中, 牛永红, 刘铨鸿, 王 羿. 基于 TCR 传热原理的混凝土复合保温衬砌渠道防冻胀效果研究[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 101—106. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.20.015 http://www.tcsae.org

Guo Rui, Wang Zhengzhong, Niu Yonghong, Liu Quanhong, Wang Yi. Anti-frost heave effect of lining channel with concrete composite insulation based on TCR principle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(20): 101—106. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.20.015 http://www.tcsae.org

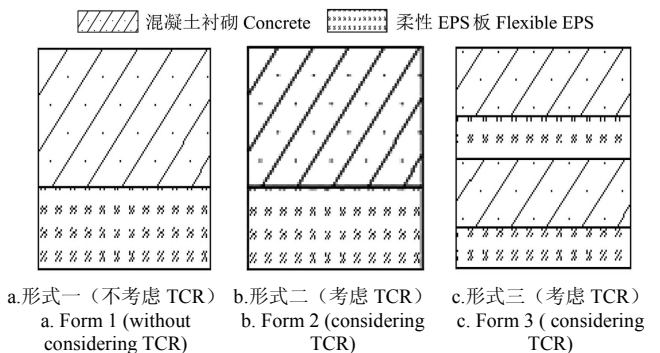
0 引 言

中国北方灌区广泛分布于季节性冻土地区^[1]。冬季负温情况下渠基土体普遍发生冻胀, 由于水泥混凝土衬砌 (包括预制混凝土板) 属于刚性衬砌材料, 抗压强度高但抗拉强度较低, 其适应拉伸变形或不均匀变形的能力较差^[2-5]。在冻胀力的作用下容易发生鼓胀裂缝、隆起架空、滑塌或整体上抬等形式的破坏^[6]。因此, 在这些地区渠道衬砌冻胀破坏成为渠道渗漏的主要原因。衬砌渠道的抗冻胀设计成为北方旱寒灌区设计的主要内容^[1]。

衬砌渠道抗冻胀设计中, 中国现有的工程实例中很多地区以采用高分子材料作为保温抗冻胀措施, 如在内蒙古与新疆大部分灌区采用苯板隔热保温措施, 从而减轻或消除渠基土体的冻深与冻胀^[7]。

在目前衬砌渠道的保温抗冻胀方面研究成果丰硕^[7-9], 就保温措施来讲主要是基于阴阳坡负温不同情况下而采用不同的保温板厚度, 并没有考虑混凝土衬砌与保温板接触热阻影响以及保温板在渠道衬砌中铺设的位置对其保温效果的影响。本文以目前在灌区常采用的柔性聚苯

乙烯 (EPS) 板为对象, 依据固体材料界面接触热阻 (thermal contact resistance, TCR) 原理与压力—热接触模型, 对混凝土衬砌渠道进行接触面传热模拟分析, 提出了一种将保温苯板与混凝土衬砌板交错布置的一体化复合保温衬砌结构形式 (形式三), 如图 1 所示。并应用 ABAQUS 有限元软件将其与普通铺设方式的苯板保温渠道采用热力耦合模拟进行比较, 分析复合保温衬砌的防冻胀效果。



注: TCR 为固体材料界面接触热阻的简称, 下文含义相同; EPS 为聚苯乙烯简称。

Note: TCR is short for thermal contact resistance; EPS is short for polystyrene.

图 1 三种渠道保温衬砌布置形式

Fig.1 Three kinds of channel insulation lining arrangement form

1 固体材料界面接触热阻 TCR 机理

由于固体材料界面接触处部位之间普遍存在着空隙。在工程实例中, 这些空隙的内部存在空气。因此在两接触面之间存在间断温差 ΔT 。两个固体材料接触面间传热的物理机理很复杂, 其中 TCR 主要是由于接触面间实际接触点的热传导与小空隙中流体的热传导这两种部

收稿日期: 2015-07-30 修订日期: 2015-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51279168); 国家科技支撑计划项目 (2012BAD10B02); 冻土工程国家重点实验室项目 (SKLSE-201105); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20120204110024)

作者简介: 郭 瑞, 男, 新疆伊犁人, 博士生, 主要从事冻土工程及渠道冻胀方面研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。

Email: guorr1025@163.com

*通信作者: 王正中, 男, 陕西彬县人, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构工程及冻土工程。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。Email: wangzz0910@163.com

分引起^[10]。因此,将固体材料界面接触热阻(TCR) R_c 定义为 ΔT 与接触面上的平均热流密度 \bar{q} 的比值:

$$R_c = \Delta T / \bar{q} \quad (1)$$

式中: ΔT 为两接触面之间存在的温度差, $^{\circ}\text{C}$; \bar{q} 为平均热流密度, W/m^2 。

接触热阻(TCR)会影响固体材料之间的传热能力。在冷却工程中,较大的 TCR 会增加制冷系统的消耗,因此,常采用降低固体材料之间的 TCR。在保温绝热工程中,又希望通过增大固体表面的 TCR。目前在美国纽约州北部的房屋墙体保温措施中采用墙板与保温板分层布置的保温措施,这种措施在一定程度上增加了接触表面的 TCR,使墙体保温效果明显^[11]。

2 TCR 传热模型

接触面的热流本构方程:

$$q = \lambda [T_a, T_b, p_n] [T_b - T_a] \quad (2)$$

式中: q 为固体接触面上的热流量, W/m^2 ; T_a , T_b 为两接触面上对应点处的温度, $^{\circ}\text{C}$; p_n 为接触面上的压应力, N/mm^2 ; λ 为接触面导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

TCR 的出现主要是由于在固体接触面处存在“细微接触区”和“微空洞区”。因此,接触面处的导热系数包括“细微接触区”引起的导热系数 λ_c 与“微空洞区”引起的导热系数 λ_k ^[12]。在固体材料接触面上,接触传热与作用在接触面上的压应力具有一定的相关性。目前根据已有实验研究表明^[13]:作用在接触表面上的压应力是影响接触热阻的主要因素。在建立 TCR 传热模型时,接触面上的压应力是一个不可忽略的重要指标。在压应力作用下,实际接触处常发生弹塑性变形。综合考虑这些因素,并结合目前已有研究提出的许多半经验的 TCR 关联式。在本文研究中采用弹塑性热接触模型,以保证作用在接触面上的压应力与热传递的关系。为了使计算简化,但不失一般性,本文采用目前常见的弹塑性热接触模型^[12,14]:

$$\lambda = \eta \left[\frac{p_n}{M} \right]^{\varepsilon} \quad (3)$$

式中: M 为接触面材料参数,取材料弹性模量; η , ε 为待定系数; p_n 为接触面上的压应力, N/mm^2 。

对于混凝土衬砌板、保温板及渠基土在热传导分析时,由于渠基土体的冻结过程缓慢,将其看成二维平面应变问题的稳态热传导过程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0 \quad (x, y) \in A \quad (4)$$

式中: λ_x , λ_y 为冻土沿 x , y 方向的热传导系数; A 为计算冻胀区域; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

3 混凝土复合保温衬砌

输水渠道的混凝土衬砌主要作用包括^[1,15]:减小渗漏及糙率、增加过流能力以及渠道衬砌的稳定效果。为了使本文研究内容具有对比性,在设计复合保温衬砌时保

持混凝土衬砌板总厚度及保温板总厚度不变,以北疆阿勒泰灌区农十师梯形干渠作为原型渠道。原型渠道混凝土衬砌总厚度为 10 cm。在本文分析计算中采用 3 种渠道衬砌保温形式。由图 1 可知,形式一的衬砌渠道不考虑混凝土衬砌与保温板之间的接触,认为混凝土衬砌板与下部保温板之间完全紧密结合,这与以往的研究相同。阳坡和渠底保温板厚度为 6 cm,阴坡保温板厚度为 8 cm,布置形式为:10 cm 混凝土衬砌+保温板;形式二与形式一衬砌渠道布置方式完全一样,但是,形式二认为混凝土衬砌与保温板接触之间存在“微空隙区”,分析计算过程中考虑接触面上的 TCR,这更加贴近实际渠道工程。

为了保证衬砌板具有相同的自重^[15],形式三的混凝土衬砌总厚度和原型渠道、形式一及形式二相同。形式三的渠道保温衬砌交错布置形式为:阳坡上层混凝土衬砌厚度为 5 cm,下部两层保温板厚度均为 3 cm,两层保温板中间夹层混凝土厚度为 5 cm;阴坡上层混凝土衬砌厚度为 5 cm,下部两层保温板厚度均为 4 cm,两层保温板中间夹层混凝土厚度为 5 cm。上下两层的保温板厚度之和与形式一和形式二的保温板厚度相同。形式三采用这种交错布置形式的依据是混凝土衬砌渠道在仅满足抗冲刷条件下的混凝土衬砌厚度为 5 cm,因此复合保温衬砌上部混凝土厚度为 5 cm,满足抗水力冲刷要求;上部与下部混凝土总厚度仍为 10 cm,同原型渠道一致,这也满足了渠道衬砌具有一定自重以保证相应稳定性的要求。因此,形式三采用的复合保温衬砌是合理的。

4 复合保温衬砌防冻胀有限元分析:

北疆阿勒泰地区,冬季气温低,衬砌冻胀破坏成为导致渠道严重渗漏的主要原因。本文选取灌区易发生冻胀破坏的梯形断面干渠作为模拟分析对象。

4.1 冻胀参数选取

本文选取北疆阿勒泰灌区农十师梯形干渠作为原型渠道,断面形式与基本参数如图 2 所示,原型渠冻胀基本情况如表 1 所示。

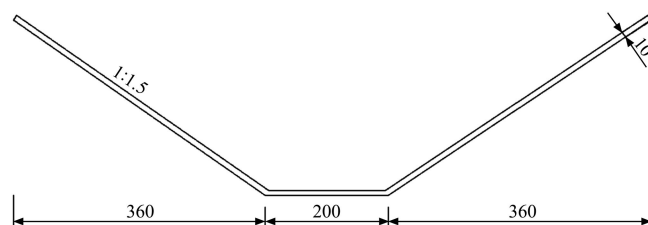


图 2 阿勒泰灌区农十师梯形干渠渠道断面图(单位: cm)

Fig.2 Aletai irrigation area of main canal of trapezoidal section

表 1 原型渠道冻胀情况

Table 1 Prototype canal frost condition

部位 Position	渠基土质 Soil	最大冻深 h/cm	冻胀量 $\Delta h/\text{cm}$	冻胀率 $\eta/\%$
阴坡 Shady slope		82	5.8	7.07
渠底 Bottom slope	粉质壤土 Silty clay	96	6.7	6.98
阳坡 Sunny slope		67	4.9	7.31

4.2 材料参数选取

混凝土、苯板的材料参数根据文献^[8-9,16]选取,如表 2 所示。由于 EPS 苯板的导热系数受含水率影响较大,根据文献^[9,17]以及渠道衬砌下苯板的工况,可偏安全选取导热系数为 $0.044 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

表 2 材料基本参数

Table 2 Parameters of Material

材料名称 Material	弹性模量 E/Pa	导热系数 $\lambda/(\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1})$	线膨胀系数 $\alpha/^{\circ}\text{C}^{-1}$	泊松比 μ
混凝土 Concrete	2.2×10^{10}	1.58	1.1×10^{-5}	0.167
EPS 板 EPS board	5.6×10^5	0.044	0	0.09

本文考虑混凝土衬砌与保温板接触处产生的 TCR,在两种固体材料接触面上的接触热导根据公式(3)确定,其中系数参照文献^[18-19],取 $\eta=95$, $\varepsilon=0.95$,其余参数如前所述。考虑接触面压应力与接触热导的关系,接触面压应力取接触面上材料自重的法向分力。

冻土的线膨胀系数是渠道冻胀热力耦合模拟中重要的物理参数,可以反映渠基土体的冻胀情况。因此,本文选取文献^[20]的冻胀线膨胀系数。冻土的导热系数随着土壤含水量的变化而发生剧烈变化。根据原型渠道渠坡与渠底处的含水量 18%, 32%依据文献^[20-22],得出相应的导热系数 0.44 和 $1.2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

4.3 有限元模型

应用 ABAQUS 有限元软件建立渠道模型,以渠基土体 10 m 深的未冻恒温层作为渠道模型的下边界条件。渠道模型的左右边界不传热,将渠道冻结作为自上而下的单向冻结,定义随场变量变化的渠基土性质^[20]。模型下边界作用固端约束,渠道左右绝热层施加水平约束。渠道上边界衬砌表面温度选取阿勒泰农十师灌区冬季 1 月份平均气温:渠底、阴坡和阳坡的温度边界分别为 -19°C 、 -22°C 和 -17°C ,渠道模型下边界温度条件取 4°C 。衬砌板与渠基土体均采用 CPE4R 单元进行网格划分,如图 3 所示。

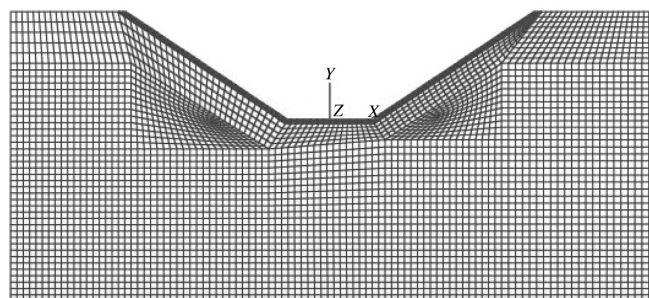


图 3 梯形渠道网格划分图

Fig.3 Trapezoidal channel meshing diagram

5 计算结果分析

首先,本文分析了原型渠道在外界负温情况下的冻胀情况。然后,在此原型渠道的基础上,分别采用文中所提的三种保温防冻胀衬砌形式进行防冻胀效果分析。分析结果如下:

5.1 温度场分析

由图 4 可以看出在这 3 种形式下渠基土体中的温度

分布有所不同,在外界作用相同温度边界条件时,形式三的零度等温线上抬最明显,其次是形式二的零度等温线,而不考虑 TCR 的普通衬砌保温渠道(形式一)中,零度等温线在距渠道衬砌底部以下最深。这说明形式三的衬砌保温形式使渠基土体冻结深度最小,在渠基土体保温过程中效果明显。

为了进一步分析这 3 种形式的保温衬砌各自保温效果不同的原因,本文对这三种形式的渠道衬砌在同一竖直断面上,温度自上而下经过各个接触面传递进行了分析。从图 5 可以看出:形式一中混凝土与保温板接触处按完全接触这种理想状态考虑。因此,在接触面上不存在温差。在形式二渠道中,接触面上温差较小,这是由于作用在接触面上的压力较大,使混凝土衬砌与保温板接触面上的微空隙区减小,接触面更加紧密,使 TCR 减小。对于形式三,混凝土与保温板接触面共有三个(如图 1 所示),对于上部接触面,作用在此接触面上的压力较小,混凝土与保温板接触面上存在一定的微空隙,从而增加了两接触面上的 TCR,使温差增大。

由图 4 和图 5 分析得到:形式三的混凝土复合保温衬砌阻断了外界负温的传导,提高渠基土体的温度场。有效地减小了渠基土体的冻结深度,提高衬砌渠道抗冻胀能力。

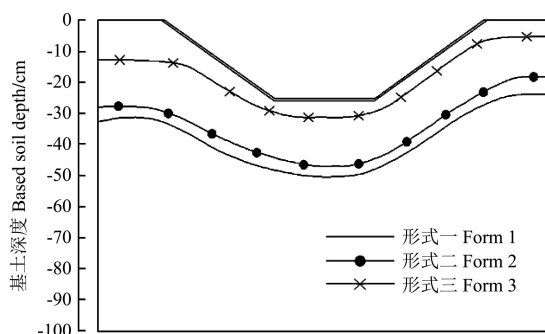


图 4 渠基土零度等温线分布图

Fig.4 Zero degree isotherm map of foundation

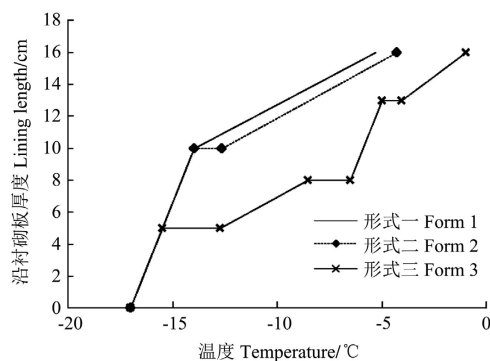


图 5 复合保温衬砌法向温度变化

Fig.5 Composite insulation lining to temperature changes

5.2 位移场分析

由图 6 可知,模拟计算得出:原型渠道冻胀位移最大值出现在渠底板处为 5.8 cm ,阴坡为 5.4 cm ,阳坡为 4.5 cm 。与表 1 实测冻胀量基本吻合,最大误差为 14%。相比于原型渠道,其他三种形式的冻胀量沿渠道分布均匀。其中,形式三渠道相比于原型渠道、形式一及形式

二渠道冻胀位移最大消减量分别为 71%、46%和 40%，消减冻胀变形效果明显。形式三衬砌的最大法向冻胀位移小于规范设计值 2 cm。

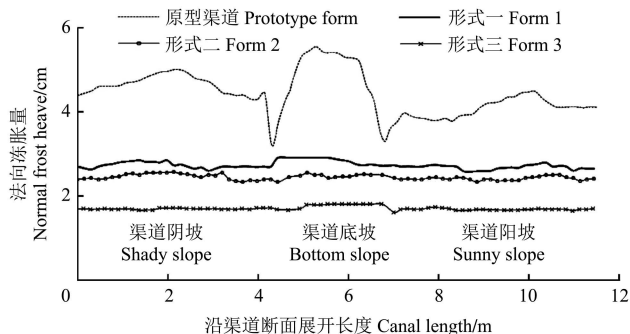


图 6 渠道冻胀量分布图

Fig.6 Frost heaving quantity of canal

5.3 应力场分析

渠基土体冻结对渠道衬砌产生法向冻胀力，如图 7a 所示，对原型渠道进行数值模拟计算得到：法向冻胀力

在渠底与渠坡交汇处达到峰值，渠底板中点处的法向冻胀力较小。形式三衬砌渠道相比于原型渠道、形式一及形式二渠道在阴坡处法向冻胀力分别消减 91%，78%和 66%。在渠道阳坡段处，形式三衬砌的法向冻胀力相比于其他几种形式也有明显的削弱。如图 7b 所示，对于形式三衬砌渠道，作用在距阴坡渠顶约 1/3 处的切向冻结力相对于原型渠道、形式一以及形式二渠道在此部位分别消减约 91%、63%和 58%。

根据图 7 可知，在具有柔性 EPS 保温板的形式一，形式二及形式三渠道的应力分析中，法向冻胀力及切向冻结力的分布相比于未采用保温板的原型渠道分布趋于均匀，这是由于在这 3 种形式中，混凝土衬砌未与渠基土体接触，减小了混凝土衬砌板与渠基土体之间的摩擦力。并且，设置在混凝土衬砌板与渠基土之间的保温板具有一定柔性，在渠基土体发生冻胀时，保温板有一定的缓冲及释放应力的作用，使作用在渠道衬砌上的应力分布均匀，这很大程度上改善了渠道衬砌的受力情况。

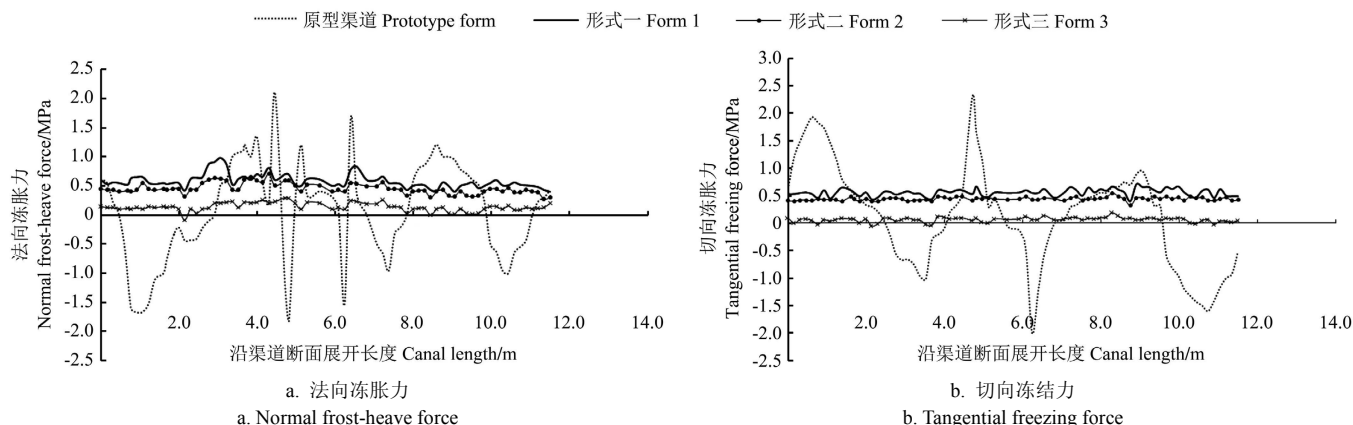


图 7 冻胀力与冻结力分布图

Fig.7 Normal and tangential freezing force distribution

6 结 论

1) 针对以往在渠道保温模拟计算中，理想化地认为混凝土衬砌板与保温板完全紧密接触的问题，根据固体材料 TCR 原理，分析了考虑接触面上 TCR 与简化的不考虑 TCR 的混凝土保温衬砌进行对比，得出外界负温传递到渠基土时的温度变化情况。

2) 结合固体材料 TCR 原理与压力相关的传热本构模型，提出了混凝土复合保温衬砌(形式三)。通过 ABAQUS 有限元软件采用热力耦合模拟，对形式三衬砌中的温度传导进行分析。结果表明：混凝土衬砌与保温板不同接触面上的温差明显不同，在压应力较小的接触面上温差较大，在混凝土与保温板底部的接触面上温差较小，这也体现出固体材料 TCR 与接触压应力之间的关系。

3) 分析了形式三衬砌与本文提到的其他几种衬砌形式，在消减冻胀方面的效果。结果表明：复合保温衬砌(形式三)、形式一及形式二衬砌均使冻胀力和法向冻胀位移分布均匀。但是在消减法向冻胀力和切向冻结力方面，复合保温衬砌效果更加明显，在阴坡处相比于其他两种保温衬砌，其冻胀力进一步消减达到 60%以上。

【参 考 文 献】

- [1] 彭世彰, 高晓丽. 提高灌溉水利用系数的探讨[J]. 中国水利, 2012, (1): 33—35.
Hu Shizhang, Gao Xiaoli. Improving irrigation water utilization coefficient[J]. China Water Resources, 2012, (1): 33—35. (in Chinese with English abstract)
- [2] 廖云, 刘建军, 陈少峰. 混凝土渠道冻胀破坏机制与抗冻技术研究进展[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊): 211—214.
Liao Yun, Liu Jjianjun, Chen Shaofeng. Research progress of damage mechanism of frost heave and anti-frost technique of concrete canal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(supplement): 211—214. (in Chinese with English abstract)
- [3] 王正中, 李甲林, 陈涛. 弧底梯形渠道砼衬砌冻胀破坏的力学模型研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 18—23.
Wang Zhengzhong, Li Jialin, Chen Tao, et al. Mechanics models of frost heaving damage of concrete lining trapezoidal canal with arc-bot tom[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(1): 18—23. (in Chinese with English abstract)

- [4] 王正中. 梯形渠道衬砌冻胀破坏的力学模型研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 24—29.
Wang Zhengzhong. Establishment and application of mechanics models of frost heaving damage of concrete lining trapezoidal open canal[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(3): 24—29. (in Chinese with English abstract)
- [5] 申向东, 张玉佩, 王丽萍. 混凝土预制板衬砌梯形断面渠道的冻胀破坏受力分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 80—85.
Shen Xiangdong, Zhang Yupei, Wang Liping. Stress analysis of frost heave for precast concrete panel lining trapezoidal cross-section channel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(16): 80—85. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李甲林, 王正中. 渠道衬砌冻胀破坏力学模型及防冻胀结构[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013: 60—70, 107—126.
- [7] 银英姿, 申向东, 步丰湖, 等. 冻土区渠道保温防冻措施对比研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2010, 31(4): 209—213.
Yin Yingzi, Shen Xiangdong, Bu Fenghu, et al. Comparative study on channel frost heave and insulation measures for permafrost region[J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2010, 31(4): 209—213. (in Chinese with English abstract)
- [8] 郭婧. 渠道衬砌聚苯乙烯保温板防冻胀效果数值模拟[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013
Guo Jing. Application and numerical simulation of polystyrene insulation board in concrete lining canal[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [9] 安鹏, 邢义川, 张爱军. 基于部分保温法的渠道保温板厚度计算与数值模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 54—62.
An Peng, Xing Yichuan, Zhang Aijun. Thickness calculation and numerical simulation of insulation board for canal using partial insulation method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(17): 54—62. (in Chinese with English abstract)
- [10] Shai I, Santo M. Heat transfer with contact resistance[J]. Heat Mass Transfer, 1982, 24: 465—470.
- [11] Trujillo D M, Pappoft C G. A general thermal contact resistance finite element[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2010, 38: 263—276.
- [12] 张洪武, 廖爱华, 张昭, 等. 具有界面热阻的接触传热耦合问题的数值模拟[J]. 机械强度, 2004, 26(4): 393—399.
Zhang Hongwu, Liao Aihua, Zhang Zhao, et al. Numerical simulation for heat transfer and contact problems with a thermal-resistant constitutive model[J]. Journal of Mechanical Strength, 2004, 26(4): 393—399. (in Chinese with English abstract)
- [13] 顾慰兰. 接触热阻的试验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1992, 24(1): 46—53.
Gu Weilan. Experiment on thermal contact resistance[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1992, 24(1): 46—53. (in Chinese with English abstract)
- [14] Wang A L, Zhao J F. Review of prediction for thermal contact resistance[J]. Sci China Tech Sci, 2011: 1798—1808.
- [15] GB/T 50600-2010, 渠道防渗工程技术规范[S].
- [16] Duskov M. Materials research on EPS 20 and EPS 15 under representative conditions in pavement structures[J]. Geo-textiles and Geomembrance, 1997, (15): 147—181.
- [17] 杜骋, 杨军. 聚苯乙烯泡沫(EPS)的特性及应用分析[J]. 东南大学学报, 2001, 31(3): 138—142.
Du Cheng, Yang Jun. Expanded polystyrene (EPS) geofoam: an analysis to characteristics and applications[J]. Journal of Southeast University, 2001, 31(3): 138—142. (in Chinese with English abstract)
- [18] Madhusudana C V, Fletcher L S. Contact heat transfer the last decade[J]. AIAA, 1986, 24: 510—523.
- [19] Majumdar A, Bhushan B. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces[J]. ASME J Tribol, 1991, 113(1): 1—11.
- [20] 李爽, 王正中, 高兰兰, 等. 考虑混凝土衬砌板与冻土接触非线性渠道冻胀数值模拟[J]. 水利学报, 2014, 45(4): 497—503.
Li Suang, Wang Zhengzhong, Gao Lanlan, et al. Numerical simulation of canal frost heaving considering nonlinear contact between concrete lining board and soil[J]. Shuili Xuebao, 2014, 45(4): 497—503. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王正中, 袁驷, 陈涛. 冻土横观各向同性非线性本构模型的实验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1215—1218.
Wang Zhengzhong, Yuan Si, Chen Tao. Study on the constitutive model of transversely isotropic frozen soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1215—1218. (in Chinese with English abstract)
- [22] 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.
Wang Zhengzhong, Sha Jide, Jiang Yunjing, et al. Nonlinear finite element analysis of interaction of orthotropic frozen ground and construction[J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(3): 55—60. (in Chinese with English abstract)

Anti-frost heave effect of lining channel with concrete composite insulation based on TCR principle

Guo Rui¹, Wang Zhengzhong^{1,2*}, Niu Yonghong², Liu Quanhong¹, Wang Yi¹

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

2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In cold regions of northern China, the anti-frost heaving measures of lining channels were widely used. In the design of anti-frost heaving benzene insulation board, laying thickness was generally determined on the basis of semi-theoretical and half-experience analyses. However, it did not consider the thermal contact resistance (TCR) between canal lining and insulation board, as well as the influence of the staggered arrangement on thermal-insulating performance and anti-frost heave. Therefore, original canal insulation model was too idealistic. Based on the principle of TCR of solid materials and the stress-related heat transfer constitutive model, the paper presented a new concrete composite insulation lining. In order to explore the effect of anti-frost heaving capability and the anti-frost heaving mechanism, taking a trapezoidal channel in Altay irrigation area of northern Xinjiang as the simulation object and considering the impact of the frost heaving, the prototype channel model was set up. Based on this model, the anti-frost heaving effect of the EPS (expanded polystyrene) thermal insulation board on the channel was analyzed. The temperature field, stress and displacement field were calculated and analyzed by the thermo-mechanical coupling field finite element method. The composite thermal-mechanical simulation was used to compare the new one and the ordinary benzene insulation board by means of the finite element software ABAQUS. Simulation results showed that for the temperature field, the zero degree isotherm in the composite insulation lining channel soil was higher than that in the channel with EPS insulation board, and the maximum difference was nearly 20.3 cm. The concrete composite insulation lining could not only block the conduction of the negative temperature outside and improve the temperature of the soil, but also reduce the freezing depth of the soil and improve the anti-frost heaving ability effectively. For the displacement field, the distribution of the frost heaving amounts in the channel with EPS insulation board was even. Among these models, the frost heaving amounts of the channel with the composite insulation lining could be reduced by 71%, 46% and 40% respectively compared to the prototype channel and the other 2 models, which showed that the anti-frost heave effect was obvious. Similarly, the frost heaving force that functioned on canal lining was analyzed and compared, mainly including normal frost heaving force and tangential freezing force. In the stress analysis of flexible EPS insulation board composite insulation lining, the friction between concrete lining plate and foundation soil was reduced as the concrete lining did not contact with the soil. The EPS board between concrete lining and foundation had certain flexibility, and when the frost heaving of canal foundation occurred, it would release stress and distribute channel lining stress evenly. Compared with the prototype channel, the distribution of normal and tangential freezing force of the concrete composite insulation lining channel tended to be uniform, which improved the stress of the channel lining greatly. However, in terms of reducing the normal and tangential freezing force, the channel with the composite insulation lining was more obvious than the other 2 types of insulation linings in shady slope, and the frost heaveing force in this model could be reduced by 60% or more. Compared with the prototype channel and the other 2 types of channels, the normal frost heaving force in this model in shady slope was decreased by 91%, 78% and 66% respectively. In the sunny slope, the normal frost heaving force in the channel with the composite insulation lining was evidently decreased compared with the other 3 types. For the channel with the composite insulation lining, the tangential freezing force in shady slope about 1.0 meter from the top of the channel was decreased by 91%, 63% and 58% respectively compared with the prototype channel and the other 2 types of channels. Therefore, the composite insulation lining has stronger heat insulation and anti-frost heave capability than the ordinary insulation lining in the negative temperature. The research provides the theoretical reference for the design of the thermal insulation lining channel in cold regions.

Key words: concrete lining; insulation; model; EPS insulation board; TCR; composite insulation; anti-frost