

# 混凝土衬砌渠道置换防冻胀标准化技术模式

李根<sup>1</sup>, 何武全<sup>1,2</sup>, 宋清林<sup>1</sup>, 张宇峰<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 陕西杨凌职业技术学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 冻胀破坏是制约季节性冻土地区渠道衬砌与防渗工程建设的关键因素, 采用非冻胀性材料置换渠道冻胀性土壤是有效防止渠道冻胀破坏的措施之一。针对北方寒冷地区渠道冻胀破坏的特点及置换防冻胀技术应用中存在的问题, 提出了混凝土衬砌渠道置换防冻胀标准化结构形式, 明确了其适用条件和范围, 确定了置换层施工的技术要求, 并基于热阻等效原理建立了置换层厚度的计算公式, 根据工程实例数据确定了计算修正系数, 并利用新疆冲乎尔灌区渠道置换防冻胀试验进行了验证, 最终的置换层厚度计算值与最佳设计值之间最大误差仅为 4.3%, 表明该计算公式有较高精确度, 对渠道置换防冻胀工程的设计建设可起到一定参考作用。

**关键词:** 混凝土衬砌渠道; 置换防冻胀; 标准化模式; 热阻等效原理

**中图分类号:** TU992.23 **文献标识码:** A

## Standardization Mode of Replacement Frost Heave Prevention for Concrete Lined Canal

LI Gen<sup>1</sup>, HE Wu-quan<sup>1,2</sup>, SONG Qing-lin<sup>1</sup>, ZHANG Yu-feng<sup>3</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China; 2. Key laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Yangling 712100, Shaanxi Province, China; 3. Yangling Vocational & Technical College, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

**Abstract:** Frost heave damage is a key constraint factor for the concrete lined canal construction in seasonal frozen soil areas. Using non-heaving material to replace frost-heaving soil is one of the effective measures to prevent the frozen damage of concrete lined canal. According to the characteristics of the canal frost heave damage and the problems in replacement frost heave prevention, this paper puts forward a standardized structure pattern of the replacement frost heave prevention technology for the concrete lined canal, gives its conditions and scopes, and also confirms the technical requirements of the replacement layer construction. Meanwhile, based on the thermal equivalence principle, this paper establishes the calculation formula of replacement layer thickness, which is verified by the practical project. The final results show that the maximum error between calculated value and the best design value is only 4.3%, which proves that the formula has a high accuracy and can play a reference role for the design and construction of the concrete canal replacement frost heave projects.

**Key words:** concrete lined canal; replacement frost heave prevention; standardization mode; thermal equivalence principle

## 0 引言

季节性冻土地区混凝土衬砌渠道的破坏主要是由于土体在负气温下产生不均匀的冻胀变形所致<sup>[1]</sup>。混凝土衬砌渠道

的冻胀破坏不仅造成大量水资源的浪费, 还造成一些地区地下水位大幅上升, 土壤盐碱化严重, 可耕地面积减少, 同时使得灌区效益低下、运营成本增加、运行管理艰难<sup>[2-4]</sup>。采用非冻胀性或弱冻胀性材料置换渠道冻胀敏感性土体是寒冷地区常用

收稿日期: 2014-10-20

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划课题(2012BAD08B01); 水利部科技推广计划项目(TG1214)。

作者简介: 李根(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为节水灌溉工程技术。E-mail: 892227985@qq.com。

通讯作者: 何武全(1967-), 男, 副教授, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: hewuquan1967@sina.com。

的渠道防冻胀措施,朱强等<sup>[5]</sup>(1988年)提出采取砂砾石置换渠道基土进行防冻胀,通过大量试验研究,建立了置换比与残余冻胀率之间的关系,并根据不同的土壤水分条件,提出了砂砾置换层厚度及置换材料级配的设计准则;赵碧雄等<sup>[6]</sup>(1986年)在内蒙古宁城甸子灌区通过渠道防冻胀试验,证明风积砂是一种防冻胀效果良好的材料,并得出了地下水为0.5m时的不同置换方式置换层厚度的取值范围,同时得到置换层含水率的大小与地下水埋深的关系;安鹏等<sup>[7]</sup>(2013年)基于热阻等效原理建立了置换层厚度的计算公式,并结合实际工程进行了验证,结果表明渠道置换防冻胀后阴坡的冻胀力与冻胀量削减高达90%以上,衬砌结构受力改善显著,冻胀量也分布更加均匀;王文杰等<sup>[8]</sup>(2013年)建立了考虑多种影响因素共同作用后的渠道冻胀模型,通过热-力耦合模拟计算得出了适宜的置换厚度,对渠道置换防冻胀的优化设计提供了一定参考。但是,目前在工程应用中,采用的渠道置换防冻胀结构形式不尽相同,也缺乏系统的研究,给工程设计和施工带来了一定的技术难度;另外,置换层厚度的科学合理确定,缺少较好的理论计算公式,大多还是通过经验公式进行计算,现行规范<sup>[9]</sup>所给的置换比范围较大,实际应用中很难选。因此,系统深入的研究混凝土衬砌渠道置换防冻胀技术,提出标准化的渠道置换防冻胀技术应用模式十分必要。

### 1 混凝土衬砌渠道置换防冻胀标准化模式

混凝土衬砌渠道置换防冻胀技术应用模式包括渠道置换防冻胀标准化结构形式、适用条件与范围、置换层厚度的计算公式、置换层的施工技术要求等。

#### 1.1 渠道置换防冻胀标准化结构形式

根据季节性冻土地区渠道冻胀破坏的特点和置换防冻胀技术应用中存在的问题,结合北方寒冷地区大型灌区渠道置换防冻胀技术应用情况的调查结果,提出了“现浇或预制混凝土板+砂浆过渡层+复合土工膜+砂砾置换层”的渠道置换防冻胀标准化结构形式,详见图1。该结构形式具有防渗防冻胀效果好、适用范围广、经济实用等优点。

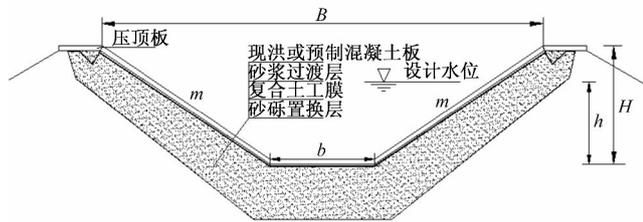


图1 混凝土衬砌防渗渠道置换防冻胀标准化结构形式  
Fig.1 The standardized structure pattern of replacement frost heave prevention for concrete lined canal

#### 1.2 标准化结构形式适用范围及条件

(1)渠基土为冻胀性土,基土的冻胀级别达Ⅲ级及以上或冻胀量为5cm以上,冻胀破坏严重,砂砾石、粗砂等非冻胀材料丰富且价格较低的季节性冻土地区。

(2)采用混凝土等刚性衬砌防渗渠道,渠道断面宜为梯形、弧形坡脚梯形、弧形底梯形,大型渠道宜采用梯形断面,中、小型渠道宜采用弧形坡脚梯形或弧形底梯形断面。

(3)现浇或预制混凝土板均应设置伸缩缝,缝宽一般为2~3cm,并采用渠道专用填缝材料填充。预制混凝土板应按模数每6~8m设置一伸缩缝,现浇混凝土板每3~5m设置一伸缩缝。

(4)复合土工膜可采用“一布一膜”或“两布一膜”,膜料应采用聚乙烯塑膜(PE塑料薄膜);若为现浇混凝土板,复合土工膜宜采用“两布一膜”,可不设砂浆过渡层;若为预制混凝土板,复合土工膜宜采用“一布一膜”,在混凝土板与复合土工膜之间铺设2~3cm厚的砂浆过渡层。

(5)置换料采用砂砾石、风积砂、河砂等非冻胀性或弱冻胀性材料,并且要严格控制置换料中黏粒土、粉粒土等细颗粒的含量,置换材料中粒径小于0.075mm的土粒含量一般应控制在10%以下。

(6)地下水位应低于渠底置换层以下,或采用排水措施将地下水位降低到渠底置换层以下;当地下水位较高且排水困难时,渠底不宜进行衬砌防渗。

(7)梯形渠道采取置换措施后边坡系数不宜过大,根据渠道边坡的稳定性要求边坡系数的取值一般小于1:1.25。

### 1.3 置换层厚度计算公式的建立

目前,计算置换层厚度的方法主要有热阻等效原理<sup>[7]</sup>、数值模拟<sup>[8]</sup>、经验公式法<sup>[9]</sup>。采用传统经验公式计算,由于置换比取值范围较大,使得计算结果难以准确把握,给工程带来较大困扰;数值模拟一般是基于较多假设的基础上,具有一定参考价值,但在实际工程应用中并不方便。本文基于热阻等效原理同时考虑了渠道允许预留一定冻土层,建立了渠道设计需要消除的冻土层厚度与渠道衬砌防渗置换层多层材料之间的热阻等效方程,即:

$$R_n = \frac{Z_n}{\lambda_f} = \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{\delta_m}{\lambda_m} + \frac{\delta_z}{\lambda_z} \tag{1}$$

式中: $Z_n$ 、 $\delta_c$ 、 $\delta_m$ 、 $\delta_z$ 分别为设计需要消除的冻土层厚度、混凝土衬砌层(包含砂浆过渡层)、复合土工膜、置换层的厚度,m; $\lambda_f$ 、 $\lambda_c$ 、 $\lambda_m$ 、 $\lambda_z$ 分别为冻土层等效导热系数、混凝土衬砌板、复合土工膜、置换层的导热系数,冻土层等效导热系数 $\lambda_f$ 主要与地下水埋深和土壤冻前含水量有关,一般通过经验公式计算,其余材料的导热系数可参考相关资料得到, $W/(m \cdot ^\circ C)$ ;  $R_n$ 为设计需要消除冻土层的热阻, $m^2 \cdot ^\circ C/W$ 。

$R_n$ 的计算可按式(2)计算。

$$R_n = \frac{Z_d a_p f - 100 \Delta h}{\lambda_f a_p f} \tag{2}$$

式中: $Z_d$ 为渠道工程设计冻深,一般通过对工程地标准冻深进行修正得到,可采用经验公式<sup>[10]</sup>计算得到,m; $a_p$ 为荷载修正系数,主要与土体干密度 $\rho_d$ 及计算点的荷载强度 $P$ 有关,由于混凝土板及置换层等的重量不是很大,即荷载修正系数一般取1.0; $f$ 为土的平均冻胀强度,是冻胀量与冻土层(冻深+冻胀量)之比,%; $\Delta h$ 为渠道衬砌结构允许法向位移(冻胀量),可参考规范取值,m。

合并式(1)、(2),得置换层厚度计算式为:

$$\delta_z = \lambda_z \left( \frac{Z_d f - 100 \Delta h}{\lambda_f f} - \frac{\delta_c}{\lambda_c} - \frac{\delta_m}{\lambda_m} \right) \tag{3}$$

因此,理论上只要知道渠道工程设计冻深、土的平均冻胀

强度、渠道防渗置换结构形式及材料特性,便可通过式(3)计算出置换层的厚度。

### 1.4 置换层厚度修正系数的确定

渠道采取置换防冻胀措施后,由于置换层一般为粗粒土,持水率较小且排水性好,置换层当中的含水量明显低于原基土,且渠道冻结过程中置换层不发生水分向上迁移;同时,式(3)当中土的平均冻胀强度一般通过冻胀量除以冻土层厚度或者采用经验公式计算得到,用于置换层厚度计算时往往使计算结果偏大。因此,本文根据渠道置换防冻胀实际情况,引入修正系数  $K$  对式(3)进行修正,其主要受地下水水位的影响。通过相关资料<sup>[7,11-13]</sup>得到了4种不同地下水水位所对应的  $K$  值,并利用软件进行拟合,结果表明修正系数与地下水水位具有良好的相关关系,相关度达 0.91,见图 2。

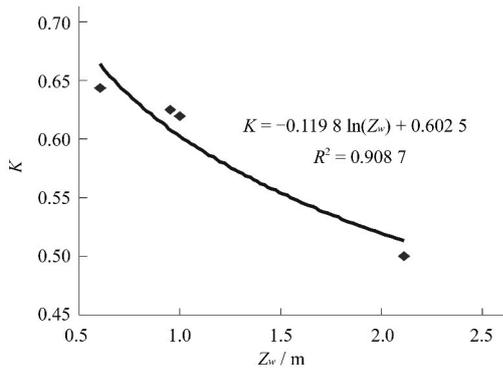


图 2 修正系数与  $K$  地下水水位  $Z_w$  的相关关系

Fig. 2 The correlation between the correction coefficient and the underground water level

因此,引入修正系数的置换层厚度计算式为:

$$\delta_z = K\lambda_z \left( \frac{Z_d f - 100\Delta h}{\lambda_f f} - \frac{\delta_c}{\lambda_c} - \frac{\delta_m}{\lambda_m} \right) = \lambda_z \{-0.1198 \ln(Z_w) + 0.6025\} \left( \frac{Z_d f - 100\Delta h}{\lambda_f f} - \frac{\delta_c}{\lambda_c} - \frac{\delta_m}{\lambda_m} \right) \quad (4)$$

### 1.5 置换层施工的技术要求

渠道防渗置换防冻胀工程施工中,现行规范对渠基开挖与填筑、混凝土衬砌板、膜料铺设、砂浆过渡层等的施工技术均有相应的规定,但是对置换层的施工尚无统一的施工技术要求和质量控制与检验标准。根据渠道防渗置换防冻胀工程施工经验,置换层施工中应满足下列要求:

(1)置换材料要求。置换材料应采用砂砾石、粗砂等非冻胀性材料。当采用天然的砂砾石或粗沙(如戈壁料、风沙)时,砂砾石或沙粒中的石子的最大粒径不大于 50 mm,不得含有草根等有机质,砂砾或粗沙中含有塑性指数的土时,小于 0.075 mm 的颗粒含量不超过总量的 10%。

(2)置换材料的铺设与碾压。置换层铺设施工前,需正确计算各段所要的材料数量,根据运料车辆的吨位,计算每车材料的堆放距离;检查渠基面平整坚实,不得有突起、松动块体、虚土浮渣,断面尺寸符合规范和设计要求。置换材料应分层铺设,每层铺设厚度一般为 200~250 mm;渠坡宜采用平振法,用平板振动器从下部向上部振捣,振动器移动时,每行应搭接 1/3;渠底宜采用碾压法,碾压次数以达到设计密实度为准,一般

不少于 4 遍;边角部位应采用人工夯实。

(3)施工质量的控制与检验。置换层压实后应平整、密实,断面尺寸符合设计要求,压实度应达到 93% 以上,表面平整度用 2 m 靠尺检测凹凸不超过 10 mm,置换层厚度偏小值应不大于设计厚度的 10%。

## 2 渠道置换防冻胀试验

为检验渠道置换防冻胀最佳结构形式的保温防冻胀效果,利用工程实测数据验证置换层厚度计算公式的精确度,在新疆布尔津县冲呼尔灌区东二支渠进行了渠道防渗置换防冻胀试验。

### 2.1 试验灌区及渠道概况

新疆布尔津县冲呼尔灌区海拔 700~770 m,地势为北高南低,西高东低,多年平均气温 5.4 °C,极端最高气温 39.5 °C,极端最低气温 -41.2 °C,多年平均冻土深度为 1.56 m。试验渠段位于冲呼尔灌区东二支渠上,为南北走向全挖方渠道,试验段共 40 m。试验渠道各水力要素见表 1。

表 1 试验渠道各水力要素表

Tab. 1 The hydraulic elements of the test canal

设计流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	底宽/ m	边坡系数	糙率	纵坡	设计 水深/ m	超高/ m	渠深/ m
2.0	1.2	1:1.5	0.017	1/1 250	1.04	0.26	1.3

### 2.2 试验方案

结合渠道置换防冻胀标准化结构形式,试验共涉及了 4 种不同的设计方案,具体情况见表 2。置换材料采用戈壁料。

表 2 试验渠道置换防冻胀设计方案

Tab. 2 The replacement anti-frost heave designing scheme of the test canal

试验方案	预制混 凝土板/ 8 cm	砂浆过 渡层/ 3 cm	复合土工 膜(两布 一膜)/ 1 mm	置换厚度/cm	
				渠坡	渠底
方案 1(对比段)	√	√	√	—	—
方案 2(置换 1)	√	√	√	30~50	50
方案 3(置换 2)	√	√	√	40~60	60
方案 4(置换 3)	√	√	√	50~70	70

### 2.3 观测内容和方法

渠道置换试验在每个方案试验渠段的阴坡及阳坡的 1/3、2/3 处和渠底中央分别布设观测点,观测不同试验方案的冻胀量。冻胀量根据确定的基准点用水准仪测定。在试验段渠道旁边设置观测井,观测地下水水位。试验观测从 2013 年 11 月 20 日开始,2014 年 4 月 20 日结束。

### 2.4 试验结果与分析

(1)冻胀量观测结果分析。根据试验观测的冻胀量结果,通过软件 Origin8.5 绘制出不同方案不同部位的冻胀量变化过程线图,见图 3~7。

由图 3~7 可以看出,渠道采取置换防冻胀措施后,渠道的冻胀变形不论是在渠坡还是渠底均得到了大幅度的削减并且

冻胀趋于均匀。试验渠道为南北走向,理论上东、西坡的冻胀变形量应相差不大,但是由于灌区在土体冻结前对渠道东坡上部的农田进行了灌溉,致使东坡渠段土壤的含水量偏高,最终的冻胀量较西坡明显偏大。方案4的防冻胀效果最为理想,其防冻胀效果较另外3种方案明显要好,冻胀量最小,其中渠底的最大冻胀量为0.8 cm,在规范要求(0.5~1.0 cm)范围内,满足工程要求。从试验结果可以得出,方案4为最佳方案,即渠坡上部置换50 cm,下部置换70 cm,渠底置换70 cm。

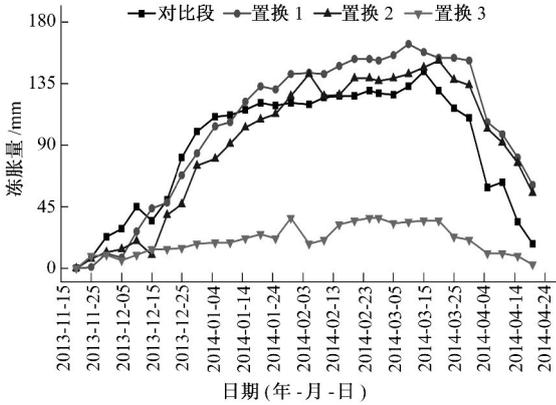


图3 试验段渠道东坡上1/3处冻胀量  
Fig. 3 The amount of frost-heaving at the top 1/3 of the east slope of canal

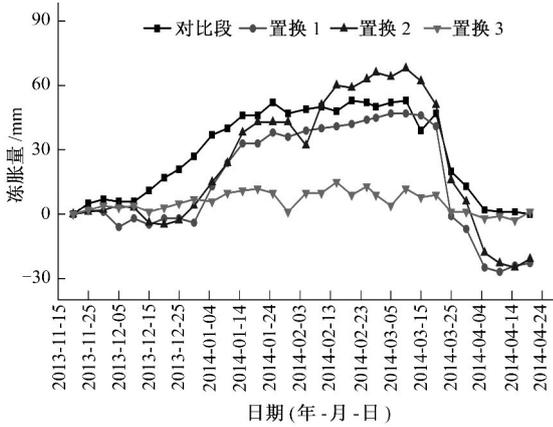


图4 试验段渠道西坡上1/3处冻胀量  
Fig. 4 The amount of frost-heaving at the top 1/3 of the west slope of canal

(2) 地下水位观测结果分析。试验渠道冻结及消融期地下水位变化过程线见图8。地下水位的监测从2013年12月5日开始,每5天观测一次,由图可以看出冻融期内地下水位均在渠底以下,距渠底的深度在0.95~2.14 m之间。冻结开始时地下水埋深为2.03 m,并逐渐降低,至翌年4月5日地下水位降到最低3.22 m,最大降幅1.19 m。

2.5 置换层厚度计算公式的验证

通过文献[14]查得,工程试验地点的冻结指数为  $I_0 = 1700 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{d}$ ;渠道日照及遮阴程度修正系数  $\varphi_d$  经查表插值计算得  $\varphi_d = 15$ ;由经验公式算得试验渠道的设计冻深为:渠坡1.61 m,渠底1.57 m。根据试验观测数据得渠基土的平均冻

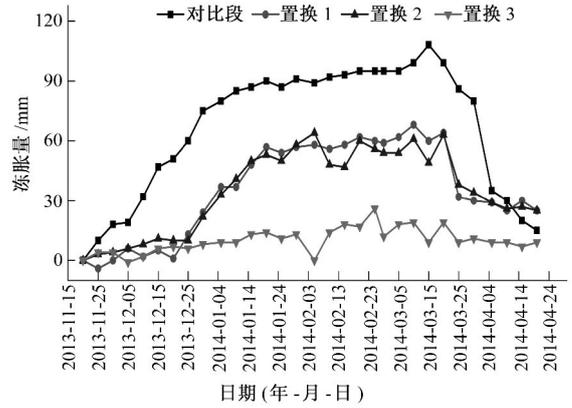


图5 试验段渠道东坡下1/3冻胀量  
Fig. 5 The amount of frost-heaving at the bottom 1/3 of the east slope of canal

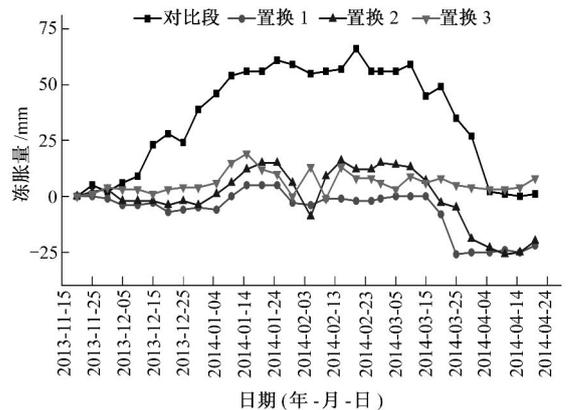


图6 试验段渠道西坡下1/3冻胀量  
Fig. 6 The amount of frost-heaving at the bottom 1/3 of the west slope of canal

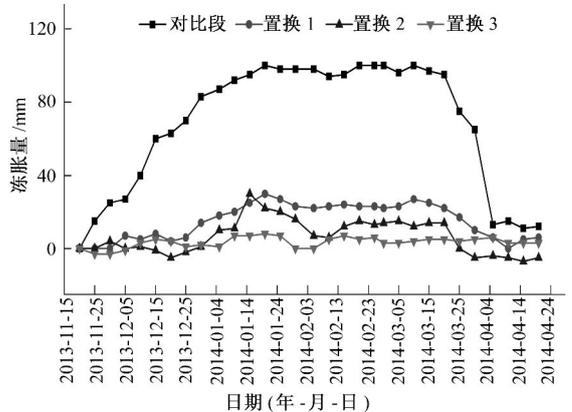


图7 试验段渠道渠底1/2处冻胀量  
Fig. 7 The amount of frost-heaving at the middle of the bottom of canal

胀强度  $f$  为:渠底4.0,渠道东坡5.03,渠道西坡1.86。本文取渠道衬砌结构允许冻胀位移为  $\Delta h = 0.01 \text{ m}$ ,由地下水位观测数据得地下水位距渠底的平均距离为1.84 m,对于渠坡的计算也用渠底的地下水位。根据参考资料[15-18]进行计算得到渠道不同部位冻土层、混凝土衬砌板(包含砂浆过渡层)、复合土

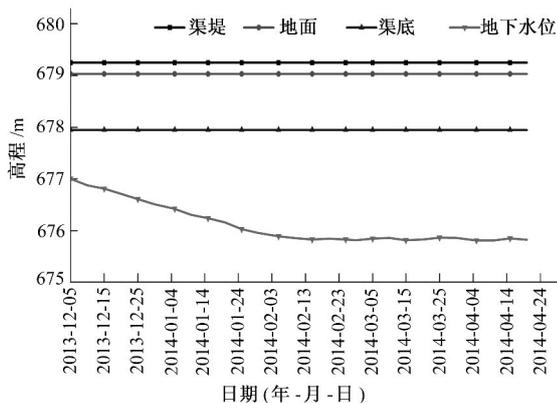


图8 渠道地下水位变化过程线

Fig. 8 The underground water level change hydrograph of the canal

工膜及置换层的导热系数,具体见表3。

表3 渠道不同部位及材料导热系数 W/(m·℃)

Tab. 3 The thermal conductivity coefficient of the canal and material

原渠道 西坡	原渠道 东坡	原渠道 渠底	混凝土 及砂浆	复合土 工膜	置换层
1.51	1.74	1.68	1.48	0.042	1.80

将上述条件代入式(4)计算得到置换层厚度  $\delta_0$  为:渠底 0.67 m, 东坡 0.70 m, 西坡 0.60 m, 考虑到试验渠道东坡的具体情况, 本文仅采用渠道西坡计算结果, 由于原渠道西坡冻土层导热系数的确定是按照渠西坡中部进行计算得到的, 因此算得的结果也应为西坡中部对应的置换层厚度, 该结果与试验最佳方案取值一致。通过经验公式计算的结果为: 渠底 0.83~1.15 m, 东坡 0.86~1.18 m, 西坡 0.86~1.18 m。对比分析可知, 本文计算结果明显小于传统算法, 并且本文计算结果与试验最佳设计方案之间最大误差仅为 4.3%, 符合工程实际需求。由此可知, 本文所得半理论、半经验置换层厚度计算公式具有较高的精度, 并且经济合理, 可对渠道置换防冻胀工程的设计建设起到一定参考作用。

### 3 结论与讨论

(1) 本文根据混凝土衬砌渠道冻胀破坏的特点及置换防冻胀技术应用中存在的问题, 提出了渠道置换防冻胀标准化技术模式, 并通过新疆冲乎尔灌区东二支渠防冻胀试验予以验证, 最终证明该模式具有良好的防渗防冻胀效果, 且经济合理, 施工方便, 易于实际工程的应用推广。

(2) 本文基于热阻等效原理提出了置换层厚度计算公式, 并利用工程实例数据引入了修正系数, 经工程试验验证, 计算结果与实际最佳设计值之间最大误差为 4.3%, 表明该公式具有良好的精度, 更能反映工程实际情况, 符合工程需求, 可为渠道置换防冻胀工程的设计起到一定参考; 同时, 本文给出了渠道置换防冻胀标准化结构形式的适用范围、条件和置换层施工的技术要求, 对渠道置换防冻胀工程的建设具有较好的指导作用。

(3) 对于渠道置换防冻胀技术来说, 防冻胀效果所受影响因素复杂多样, 不仅要分析研究其内在因素, 而且要控制外在

因素的影响, 这样才能从根本上解决渠道冻胀破坏的问题。目前, 我国大多数渠道仍是采用较为单一的防冻胀措施, 不能很好地解决渠道冻胀破坏这一难题, 为了能够彻底做好渠道冻胀破坏问题的防治, 需加大对复合防冻胀技术的系统深入的研究及应用。

#### 参考文献:

- [1] 李爽, 王正中. 考虑混凝土衬砌板与冻土接触非线性的渠道冻胀数值模拟[J]. 水利学报, 2014, 45(4): 497.
- [2] Swamee P K, Mishra G C, Chahar B R. Design of minimum seepage loss canal sections[J]. Irrigation and Drainage, 2000, 126(1): 28-32.
- [3] Upadhyaya A, Chauhan H S. Water table rise in sloping aquifer due to canal seepage and constant recharge[J]. Irrigation and Drainage, 2002, 128(3): 160-167.
- [4] Jansen H C, Bhatta M N, Javed I, et al. Groundwater modeling to assess the effect of interceptor drainage and lining[J]. Irrigation and Drainage, 2006, 20(1): 23-40.
- [5] 朱强, 付思宁. 砂-砂砾换基防治渠道冻胀的研究[J]. 冰川冻土, 1988, 10(4): 400-407.
- [6] 赵碧雄, 程满金. 风积砂换填基土防治渠道冻胀[J]. 人民黄河, 1986: 36-37.
- [7] 安鹏, 邢义川. 渠道抗冻胀垫层设计方法研究与数值模拟[J]. 岩土力学, 2013, 34(S2): 257-271.
- [8] 王文杰, 王正中. 季节冻土区衬砌渠道换填措施防冻胀数值模拟[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(6): 83-84.
- [9] SL23-2006, 渠系工程抗冻胀设计规范[S].
- [10] 何武全, 孔东. 渠道衬砌与防渗工程技术[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2011.
- [11] 杨涛, 王小华. 浅谈某工程中护坡抗冻胀垫层设计[J]. 河南水利与南水北调, 2011, (8): 8-10.
- [12] 徐峰. 寒冷地区衬砌渠道基土换填深度研究[D]. 新疆石河子: 石河子大学, 2013: 30-47.
- [13] 赵碧雄, 程满金. 宁城县风积砂补水条件下防冻胀效果试验[J]. 内蒙古水利科技, 1986: 58-66.
- [14] 白磊, 李兰海, 等. 新疆北疆地区季节性冻土结冻过程与日积温的关系[J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 329.
- [15] 王建伟, 李书民, 李振卿. 冻土层等效导热系数的探讨[J]. 防渗技术, 2001, 7(2): 20-22.
- [16] 刘锡军, 唐韬. 保温砂浆与普通砂浆基本热传导性能试验研究[J]. 湖南工程学院学报, 2013, 23(4): 84-86.
- [17] 孙斌祥, 徐学祖. 碎石粒径对寒区路堤自然对流降温效应的影响[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 809-814.
- [18] 山西省渠道防渗工程技术手册编委会. 山西省渠道防渗工程技术手册[M]. 太原: 山西科技出版社, 2003.
- [19] 郑源, 汤骅, 姜海波. U形复合衬砌渠道冻胀破坏力学模型研究[J]. 中国农村水利水电, 2013, (11): 80-84.
- [20] 张欣, 宗兆博, 宋立元, 等. 东港灌区苯板保温渠道衬砌抗冻胀试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2013, (8): 95-98.
- [21] 张国军, 陆立国. 影响衬砌渠道冻胀破坏严重的关键因素[J]. 中国农村水利水电, 2012, (9): 105-108.
- [22] 银俊梅. 弧底梯形渠的冻胀试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2011, (12): 135-138.