

# 旱寒地区 U 形玻璃钢和混凝土渠道抗冻胀性能的研究

程传胜<sup>1</sup>, 田军仓<sup>1,2,3</sup>, 王斌<sup>1,2,3</sup>, 高靖<sup>1</sup>

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021; 3. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 宁夏 银川 750021)

**摘要:** 为对比分析不同材料 U 形渠道对其抗冻胀效果的影响, 采用有限元分析软件 ADINA 以衬砌板为研究对象进行仿真模拟分析。结果表明, 玻璃钢渠道阴、阳坡最大冻胀变形比混凝土大 27.44%、27.34%, 但冻胀变形变化率减小了 4.49%~16.19%, 冻胀变形均匀; 玻璃钢渠道有很强的适应变形能力, 使衬砌板的等效应力、法向冻胀力分别减小了 43.86%、39.96%, 很大程度上减小了渠道的冻胀破坏, 值得实践并推广。

**关键词:** U 形玻璃钢渠道; U 形混凝土渠道; 冻胀变形; 仿真模拟

中图分类号: S277

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)06-0173-05

## Study on effect of anti-frost for U - shaped GFRP and concrete channel in arid and frigid area

CHENG Chuansheng<sup>1</sup>, TIAN Juncang<sup>1,2,3</sup>, WANG Bin<sup>1,2,3</sup>, GAO Jing<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Water Conservancy, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Ningxia Irrigation and Water Resources Control Engineering Technology Research Center, Yinchuan 750021, China; 3. Engineering Research Center of Efficient Use of Water Resources in Arid Modern Agriculture, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** In order to study the response of U - shaped channel of different materials to frost heave, the paper carried out numerical simulation by using ADINA software with channel lining board as research object. The results indicated that the displacements of GFRP are more 27.44%、27.34% than that of concrete in both sides of channel respectively, but the change rates of displacement decrease by 4.49% to 16.19%, the variation of frost heave is uniform; GFRP has more strong ability to adapt to deformation. The equivalent stress and frost heave force of channel lining are decreased by 43.86% and 9.96%. The U - shaped channel of GFRP can reduce the frost heaving break of channel to a large extent and is worth being widely practiced and popularized.

**Key words:** U - shaped GFRP channel; U - shaped concrete channel; frost heave deformation; numerical simulation

宁夏属于旱寒地区,年平均气温为 8.5℃,最低气温为 -24.5℃。衬砌渠道破坏主要是由渠道基土的冻胀引起的,U 形混凝土属于刚性衬砌渠道,由于其抗拉及抗弯能力较差,当衬砌不能适应基土冻胀变形或不能抵抗基土冻胀力时就会产生裂缝甚至断裂的冻胀破坏<sup>[1-2]</sup>。对于渠道防渗抗冻胀问题,“兼顾材料和结构”的防渗抗冻胀技术受到广泛共识。文献[3-5]分析了玻璃钢渠道的施工工艺与成本,与混凝土渠道相比,玻璃钢渠道施工简单、价

格低廉;文献[6-7]通过适当假设,把冻土和衬砌板作为整体的数值模拟分析温度场、位移场和应力场,得出玻璃钢渠道的抗冻胀效果优于混凝土。本文取衬砌板为研究对象,通过应用 ADINA 软件对 D60U 形混凝土衬砌渠道和玻璃钢衬砌渠道进行数值模拟,在相同的冻胀条件下分析不同衬砌材料在冻胀过程中的变形和应力分布规律以及易发生冻胀破坏区域的高峰应力的变化来揭示不同衬砌材料对抵抗冻胀效果的影响,进而为新材料 U 形衬砌渠道

收稿日期:2015-08-17; 修回日期:2015-09-11

基金项目:“十二五”农村领域国家科技计划课题(2012BAD08B01-5);教育部“长江学者和创新团队发展计划”创新团队项目(IRT1067);宁夏自然科学基金项目(NZ12148)

作者简介:程传胜(1989-),男,河南封丘人,硕士研究生,研究方向:节水灌溉理论与技术。

通讯作者:田军仓(1958-),男,陕西扶风人,博士,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究。

的优化设计提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于2014年10月16日-2015年3月8日在宁夏回族自治区银川市宁夏大学室外试验场进行,土壤为沙质土壤。试验观测渠道为挖方U形混凝土衬砌渠道,东西走向,总长20m,衬砌板厚度为5cm,净渠深为55.0cm,净口径为78.2cm,渠坡板与垂直方向夹角为 $22^\circ$ ,弧线内半径为30.0cm;U形玻璃钢渠道位于宁夏青铜峡市大坝镇蒋南村,南北走向,总长30m,衬砌板厚度为5mm,净渠深为49.5cm,净口径为64.5cm,渠坡板与垂直方向夹角为 $15^\circ$ ,弧线内半径为24.5cm,渠槽均由挖掘机开挖,人工铺砌。如图1、2所示。



图1 D60U形混凝土衬砌渠道

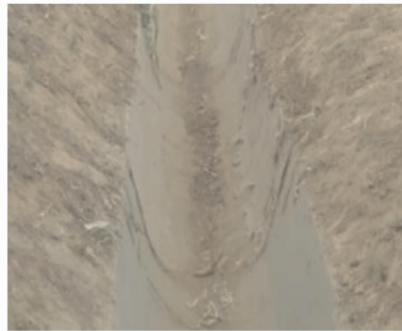


图2 D40U形玻璃钢衬砌渠道

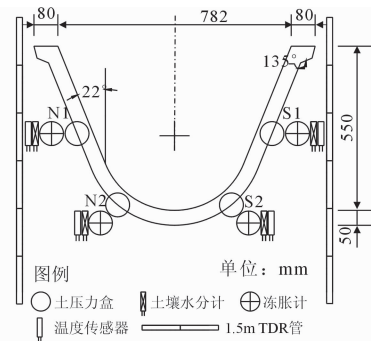


图3 渠道观测横断面和测点位置布置图

### 1.3 有限元模型及参数选取

(1)基本假设。冻结过程中,很难准确模拟渠道基土冻结与衬砌板冻胀变形之间的相互作用。由于冻土的弹性模量远远小于玻璃钢和混凝土<sup>[8-9]</sup>(约为1/10),为便于分析衬砌板在土体冻胀过程中的变形特征及应力分布规律<sup>[10]</sup>,视为冻土不参与衬砌板的弯曲变形,只对衬砌板施加位移荷载,并提供冻结约束,渠道基土冻结过程的冻胀量全部作用于衬砌板并沿衬砌板线性分布,不计衬砌自身的冻胀。

(2)有限元模型及参数选取。根据假设及原型渠道的基本情况,建立D60U形混凝土衬砌渠道3D-Solid实体模型和D40U形玻璃钢衬砌渠道Shell壳体模型;混凝土和玻璃钢渠道材料本构模型采用各向同性线弹性理论,理论基础为线弹性理论和弹性力学理论;选取混凝土和玻璃钢衬砌渠道有限元模型的约束条件为衬砌板外表面最底端受竖向和沿衬砌板纵断面方向约束,内表面自由;模型选择8节点单元进行映射划分,分别有1320和880个单元,图5是倾角为 $22^\circ$ ,厚度为5cm的混凝土渠道有限

### 1.2 试验仪器布置与观测指标

(1)试验仪器布置。在竖直方向上,距离渠顶25、47.5cm(弧线段)处分别布置冻胀计(YT-DG-0140)、土压力盒(YT-ZX-0360)、土壤水分计(YT-DY-0101)、温度传感器(YT-BD-0101),阴阳坡对称布置;在水平方向,土压力盒紧附于衬砌板上,用于采集冻胀土体对衬砌板的作用力;距离渠道10cm处布置TDR管,辅助测量土体不同深度的含水量和温度。如图3、4所示。

(2)观测指标。试验观测土体的冻胀量、土体冻胀过程中对衬砌板的作用力的大小、不同深度土壤的体积含水率、不同深度土壤的温度和土壤冻土层深度等,为了数据的安全与有效,每30min自动采集并存储数据,共同反映渠基土在冻胀过程中对渠道衬砌板的作用。

元模型,相关参数与实际模拟渠道是一致的,各模型在求解过程中,无旋转自由度,选择Displacement收敛准则,收敛精度取0.01,参考位移取1,混凝土和玻璃钢的弹性模量分别取26、12GPa,泊松比分别为0.2、0.14,密度分别为2400、2000 $\text{kg/m}^3$ 。原型观测渠道基本情况见表1。

表1 原型观测渠道(沙质土壤)基本情况

部位		冻深/ cm	冻胀量/ cm	冻胀率/ %
阴坡	N1	51	0.76	2.13
	N2	47	0.97	
阳坡	S2	23	0.71	3.38
	S1	18	0.62	

## 2 结果与分析

### 2.1 应变分析

由图6、7、8、9可以看出,阴坡冻胀变形大于阳坡,冻胀后渠道整体上抬,并向阳坡发生微小偏转。由于弧的反拱作用能够充分利用混凝土较好的抗压

性能,在弧线段冻胀力转化为轴向压力使冻胀变形较小,在直线段与弧线段交接处变形最大,混凝土阴、阳坡最大冻胀量分别为 0.854、0.669 cm,玻璃钢阴、阳坡最大冻胀量分别为 1.177、0.962 cm,并且此处附近冻胀变形有突然增大的趋势,阴坡较为明显。

图 10 表明,玻璃钢冻胀变形大于混凝土。混凝土阴坡直线段和弧线段、阳坡直线段和弧线段各观测点的冻胀量模拟值分别为 0.613、0.696、0.522 和

0.506 cm,实测值分别为 0.756、0.966、0.714 和 0.616 cm,模拟值与实测值接近,与实际工程情况相符。混凝土渠道阴坡直线段和弧线段、阳坡直线段和弧线段冻胀量变化率分别为 46.13%、65.57%、41.40% 和 56.05%,玻璃钢渠道相对应的变化率分别为 40.86%、61.08%、25.21% 和 50.21%,玻璃钢渠道变化率与混凝土相比较小,冻胀变化均匀,削减了渠道的冻胀破坏。



图 4 土压力盒安装

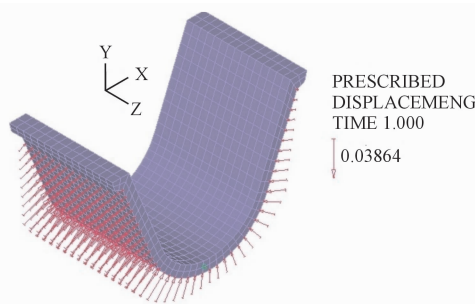


图 5 U 形混凝土衬砌渠道有限元网格图

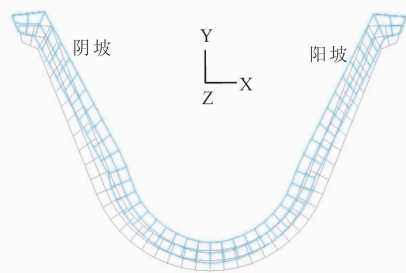


图 6 U 形混凝土渠道冻胀变形图

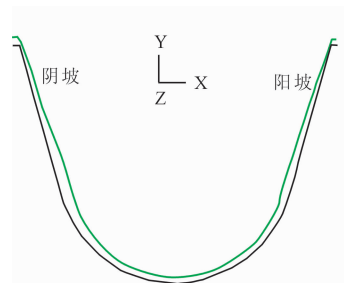


图 7 U 形玻璃钢渠道冻胀变形图

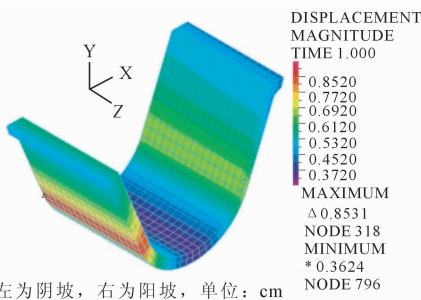


图 8 U 形混凝土渠道冻胀变形云图

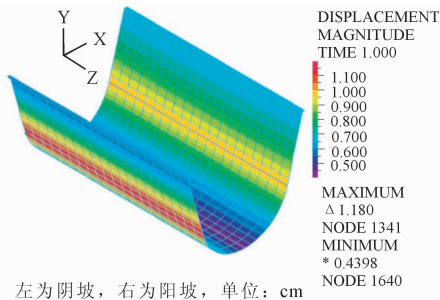


图 9 U 形玻璃钢渠道冻胀变形云图

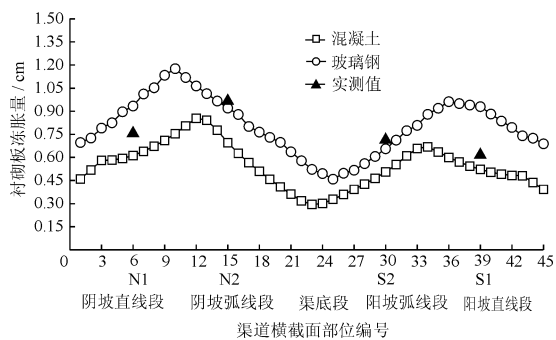


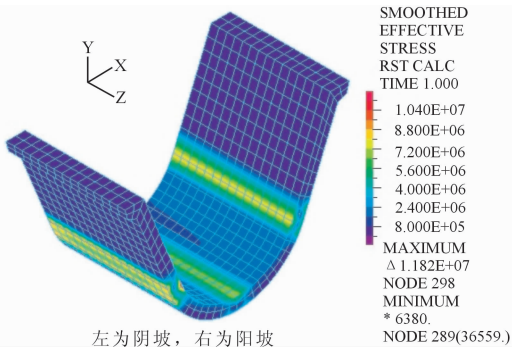
图 10 不同材料渠道变位数值模拟与实测值

### 2.2 应力分析

由图 11、12 可知,渠道阴、阳坡直线段等效应力较小,弧线段次之,渠底较大,直线段与弧线段交接处最大;图 13 表明,混凝土渠道阴、阳坡直线段内表面等效应力变化范围为 0.022 ~ 0.490 MPa,外表面变化范围为 0.022 ~ 0.123 MPa,直线段与弧线段交接处内表面变化范围 1.182 ~ 11.546 MPa,外表面 1.577 ~

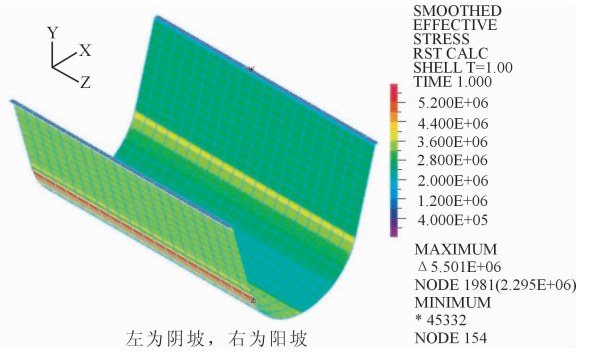
9.333 MPa,弧线段内表面变化范围为 1.934 ~ 2.768 MPa,外表面变化范围为 0.387 ~ 1.474 MPa,渠底段内表面变化范围 2.768 ~ 7.132 MPa,外表面变化范围 1.474 ~ 4.452 MPa,玻璃钢渠道直线段变化范围 0.021 ~ 3.557 MPa,直线段与弧线段交接处为 3.628 ~ 5.245 MPa,弧线段为 2.337 ~ 3.513 MPa,渠底段为 2.111 ~ 2.927 MPa,并且阴坡峰值 > 阳坡峰值 > 渠底峰值,应力峰值所在的部位是衬砌较容易发生冻胀破坏的区域,其中阴坡直线段与弧线段交接处(距渠底大约 1/3 处)出现应力峰值,最容易发生冻胀破坏的,符合工程实践情况;弧线段等效应力变化较直线段与弧线段衔接处小,这是因为弧的反拱作用充分体现衬砌板的良好抗压性能。从整体看,玻璃钢渠道等效应力相对于混凝土渠道均匀分布,没有出现局部应力集中现象,且最大等效应力从 11.546 MPa 减小到 5.245 MPa,减小了 54.5%,由此表明,玻璃钢材料有利于使衬砌板等效应力分布均匀,大大削弱应力峰值。





左为阴坡, 右为阳坡

图 11 U形混凝土渠道等效应力云图(单位:Pa)



左为阴坡, 右为阳坡

图 12 U形玻璃钢渠道等效应力云图(单位:Pa)

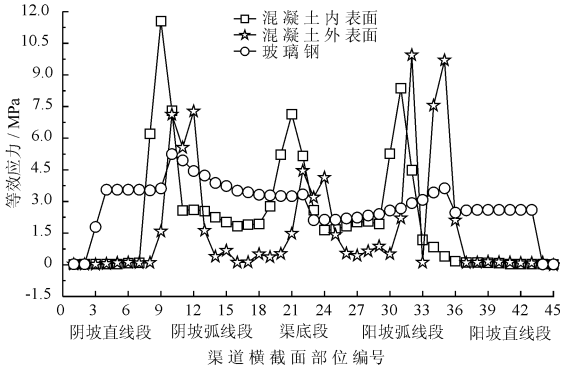
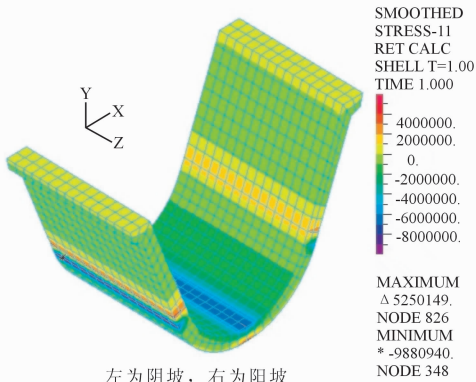


图 13 不同材料渠道等效应力数值模拟值

图 14 表明,混凝土渠道外侧,衬砌板主要受拉应力的作用,最大法向冻胀力出现在渠底(2.805 ~ 4.009 MPa),直线段与弧线段交接处次之(1.570 ~ 3.000 MPa),弧线段的法向冻胀力较小(0.153 ~

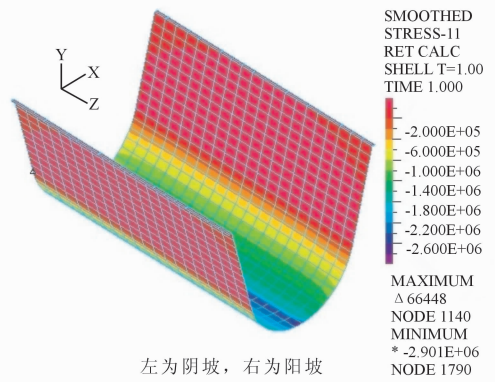
1.98 MPa),直线段的法向冻胀力最小(0.010 ~ 0.105 MPa);渠道内侧,衬砌板主要受压应力的作用,直线段法向冻胀力呈增大趋势 0.022 ~ 0.177 MPa,处于受拉状态,从交接处至渠底,法向冻胀力逐渐由受拉变为受压状态,且程度不断加剧,渠底压应力达到最大 7.058 MPa,阴坡法向冻胀力大于阳坡。

图 15 得出玻璃钢渠道法向冻胀力有相同的变化趋势,从渠顶到渠底法向冻胀力逐渐增大,直线段、直线段与弧线段交接处、弧线段、渠底段变化范围分别是 0.04 ~ 0.42、-0.437 ~ -0.933、-1.070 ~ -1.820、-2.020 ~ -2.407 MPa,由此可见,玻璃钢渠道整体变化梯度比混凝土渠道小,相对比较均匀,并且最大法向冻胀力较小,玻璃钢衬砌渠道能较好的适应土体冻胀的作用。



左为阴坡, 右为阳坡

图 14 U形混凝土渠道法向冻胀力云图(单位:Pa)



左为阴坡, 右为阳坡

图 15 U形玻璃钢渠道法向冻胀力云图(单位:Pa)

由图 16 可以看出,通过模拟得到阴坡直线段和弧线段、阳坡直线段和圆弧段观测点的法向冻胀力分别为 -0.029, -1.570, -0.099, 0.253 MPa,实测值分别为 -0.018, -1.349, -0.061, 0.353 MPa,模拟值与实测值相差不大,趋势一样。

由图 17、18 和 19 表明,混凝土渠道从上到下直线段切向冻结力逐渐增大,阴、阳坡最大值分别为 0.019、0.016 MPa,弧线段切向冻结力逐渐减小,阴、阳坡分别为 0.006 ~ 0.015 MPa、0.005 ~ 0.014 MPa。

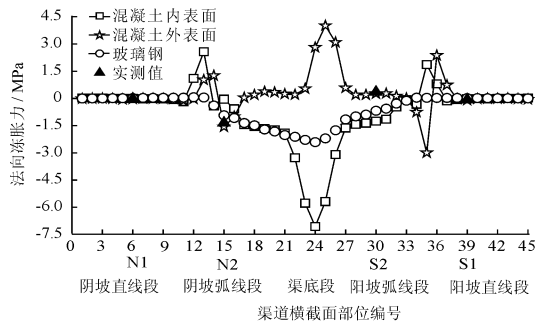


图 16 不同材料渠道法向冻胀力数值模拟值与实测值

渠底趋近于 0;玻璃钢阴、阳坡最大切向冻胀力出现在直线段与弧线段交接处,分别为 0.076、0.035

MPa,渠底段趋近于 0,玻璃钢的切向冻胀力峰值稍大于混凝土,但其变化相对比较均匀。

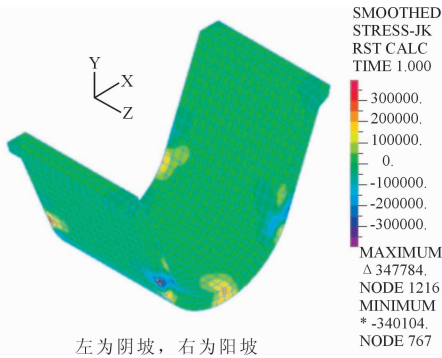


图 17 U 形混凝土渠道切向冻胀力云图(单位:Pa)

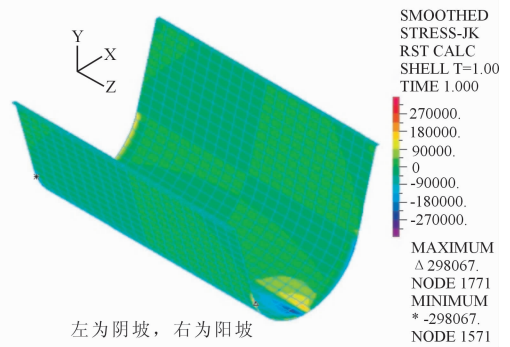


图 18 U 形玻璃钢渠道切向冻胀力云图(单位:Pa)

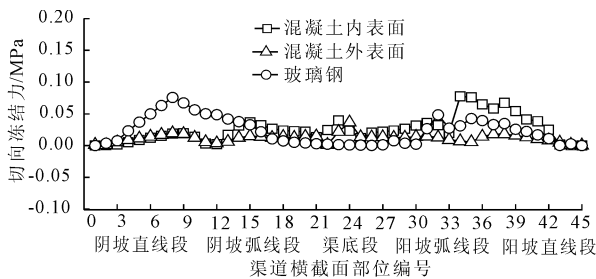


图 19 不同材料渠道切向冻胀力数值模拟值

### 3 结 语

在宁夏早寒地区,沙质土壤的挖方渠道衬砌条件下,有以下结论:

(1)应变分析结果表明,渠道冻胀变形阴坡大于阳坡,在直线段与弧线段交接处最大,渠道冻胀后整体上抬,并向阳坡发生微小偏转;玻璃钢渠道冻胀变形比混凝土大,玻璃钢渠道阴、阳坡最大冻胀变形比混凝土大 27.44%、27.34%,但冻胀变形变化率较小,冻胀变形均匀,在土壤融冻期,通过释放变形使渠道恢复原位,从而改善衬砌板的受力状态,有效地防止了渠道的冻胀破坏。

(2)应力分析结果表明,冻胀力沿渠道坡面呈上小下大分布,法向冻胀力在渠底最大,切向冻胀力在渠底几乎接近于零;混凝土渠道外侧,弧线段处于受拉状态,渠底法向冻胀力最大(4.009 MPa),渠道内侧,衬砌板逐渐由受拉变为受压状态,法向冻胀力不断增大,渠底压应力达到最大(7.058 MPa);切向冻胀力沿坡面从上到下先增大后减小,直线段与弧线段交接处达到最大(0.019 MPa),渠底趋于 0。玻璃钢渠道使等效应力、法向冻胀力分别减小了 43.86%

39.96%,从而降低渠道冻胀裂缝的产生,增加早寒地区灌溉输水渠道的使用寿命。

(3)玻璃钢渠道符合新型渠道防渗抗冻胀理论——以柔克刚,适应变形,并且有较强的整体性和稳定性,玻璃钢的防渗抗冻胀性能优于普通混凝土,值得实践并推广。

### 参考文献:

- [1] 王正中. 梯形渠道混凝土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.
- [2] 王正中, 李甲林, 陈涛, 等. 弧底梯形渠道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.
- [3] 黄俊友, 吴玉柏, 王远. 玻璃钢防渗渠道的制作和铺装工艺[J]. 防渗技术, 1998, 4(3): 27-30+37.
- [4] 李怀东. 防渗渠道新成员玻璃钢防渗渠[J]. 中国农村水利水电, 2000, (2): 29-30.
- [5] 吴玉柏, 黄俊友, 王远. 玻璃钢防渗渠道的研制[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(5): 87-90.
- [6] 闫长城, 王正中, 刘旭东, 等. 季节性冻土区玻璃钢防渗渠道抗冻胀性能初探[J]. 人民黄河, 2011, 33(3): 140-142.
- [7] 王英浩, 司娜. U形玻璃钢渠道抗冻胀效果数值模拟[J]. 内蒙古科技大学学报, 2014, 33(4): 409-412.
- [8] 郭利霞, 王正中, 李甲林, 等. 梯形与准梯形渠道冻胀有限元分析[J]. 节水灌溉, 2007, (4): 44-47+50.
- [9] 李学军, 费良军, 穆红文. U形衬砌渠道冻胀机理与防渗技术研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(3): 194-199.
- [10] 张茹, 王正中, 牟声远, 等. 基于横观各向同性冻土的 U形渠道冻胀数值模拟[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(5): 773-780+783.