

# 季节冻土区刚柔混合衬砌梯形渠道冻胀机理试验

姜海波, 田 艳

(石河子大学水利建筑工程学院, 石河子 832000)

**摘 要:** 输水渠道冻胀破坏是寒冷地区渠道破坏的主要表现。为了探明刚柔混合衬砌渠道的冻胀机理, 分析复合衬砌渠道的冻胀变形规律和冻胀过程中的水分变化规律, 以及柔性复合土工膜的变形特征, 该研究借助季节冻融条件下刚柔混合衬砌梯形渠道的原型观测成果, 分析了刚柔混合衬砌渠道的最低地温变化规律、冻深变化规律和冻胀量与冻胀力的变化规律, 重点研究了冻融条件下渠基土壤的水分迁移规律, 以及复合土工膜的变形特征和强度变化。结果显示: 刚柔混合衬砌渠道的冻胀变形最大值位于渠底和阴坡 1/3 处, 最大冻胀量为 11.2 和 13.1 cm, 衬砌结构向上隆起。冻结期, 渠基土壤 0~60 cm 深度范围内含水率随深度增加而增大, >60~120 cm 深度范围内的含水率随深度增大而逐渐减小。水分迁移最大值发生在渠道底部, 迁移率为 13.2%。经过一个冻融周期的循环, 复合土工膜的强度和变形量仍然保持在 90% 以上, 强度和变形损失值较小, 可充分发挥复合土工膜防渗抗冻胀和适应变形的特性。该研究为刚柔混合衬砌渠道的设计、推广应用提供了理论依据。

**关键词:** 渠道; 冻土; 水分; 刚柔混合衬砌渠道; 冻胀机理; 冻胀量; 冻胀应力; 水分迁移

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.020

中图分类号: S277

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-16-0145-07

姜海波, 田 艳. 季节冻土区刚柔混合衬砌梯形渠道冻胀机理试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 145—151.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.020 http://www.tcsae.org

Jiang Haibo, Tian Yan. Test for frost heaving damage mechanism of rigid-soften composite trapezoidal canal in seasonally frozen ground region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(16): 145—151. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.020 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

渠道防渗措施是减少渠道输配水损失、提高输配水效率的重要工程措施。季节冻土区土体的冻胀和融沉使渠道混凝土衬砌产生不同程度的破坏。根据统计资料的分析, 渠道冻胀破坏造成的损坏占渠道总破坏量的 40% 以上, 每年用于处理渠道冻胀损坏的费用超过总维修费的 60%, 渠道冻胀破坏严重影响了渠道的正常运行<sup>[1]</sup>。

季节冻土区渠基土壤的冻胀与融沉是渠道破坏的主要原因。目前渠道的抗冻胀设计主要是以“适应、回避、削减冻胀”为设计依据, 主要采用的是抗冻胀的结构、保温材料、防渗排水、基土换填等工程措施, 以达到“适应、消减冻胀破坏”的作用<sup>[2]</sup>。根据现有的研究表明<sup>[3-8]</sup>, 刚性混凝土衬砌渠道的冻胀与融沉破坏与其本身的结构和材料密切相关。渠道混凝土衬砌体属于刚性材料, 由于材料属性和施工等方面的原因, 其本身就存在缺陷, 在没有破坏之前就存在着裂纹, 称为混凝土材料的初始裂纹, 混凝土衬砌体的冻胀破坏, 绝大多数都是在各种冻胀力作用下随着初始裂纹的发展而产生断裂破坏<sup>[9]</sup>, 从而加大了渠道的渗漏量。渠基土壤的含水率进一步增加,

从而加大了渠道的冻胀破坏, 最终导致混凝土衬砌结构发生大面积断裂。

从刚性衬砌渠道冻胀的机理<sup>[10]</sup>来看, 渠道冻胀的发生需要满足 3 个基本条件: 渠基土壤是冻胀性土、持续的负温、含水率超过了基土的初始冻胀的含水率<sup>[11]</sup>, 只要将其中的某一因素控制在一定水平, 就可以防止渠道冻胀的发生<sup>[12]</sup>。而从刚性衬砌渠道冻胀破坏的形式来看, 主要的破坏形式为衬砌结构鼓起裂缝、隆起架空、整体上抬、板块错位, 严重的还会造成衬砌破碎或滑塌, 说明刚性衬砌体不能有效地适应、消减冻胀变形。而刚柔混合衬砌结构抗冻胀效果非常明显, 而且冻胀变形、冻胀力分布更加均匀, 是一种更为有效的渠道抗冻胀结构<sup>[13]</sup>, 能同时有效解决渗漏和冻胀问题。南水北调中线工程 S11 标段渠道全部采用刚性混凝土板衬砌下增设柔性复合土工膜的加强防渗结构型式<sup>[14]</sup>。在刚性混凝土衬砌体下铺设一层柔性的复合土工膜或者柔性的防水卷材等, 使刚柔混合衬砌渠道具有“双防”功能, 既达到防水的目的又起到不冻或冻胀而不破坏的效果<sup>[15]</sup>。

在季节冻土区, 新型的高性能保温和防渗柔性材料的发展都将使刚柔混合衬砌渠道的应用有更广阔的发展前景。但是刚柔混合衬砌渠道的冻胀破坏机理与刚性衬砌渠道不同, 它有其自身的特点, 尤其是一个完整冻融的环境温度影响下, 渠道冻胀的变化过程是室内试验无法确切模拟的, 而目前对这一课题的研究成果较少。为了探明刚柔混合衬砌渠道的冻胀机理, 该研究借助季节

收稿日期: 2015-05-24 修订日期: 2015-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51269029)和石河子大学高层次人才科研启动基金项目(RCZX201128)。

作者简介: 姜海波, 男, 湖南长沙人, 副教授, 博士, 主要从事水工结构的抗冻试验及数值模拟研究工作。石河子 石河子大学水利建筑工程学院, 832000. Email: klaud\_123@163.com

冻融条件下刚柔混合衬砌梯形渠道的原型观测成果, 重点研究冻融条件下渠基土壤的水分迁移规律, 以及刚柔混合衬砌渠道的冻胀变形规律, 为季节冻土区刚柔混合衬砌渠道的设计、施工及推广应用提供理论依据。

## 1 刚柔混合衬砌渠道冻胀试验

### 1.1 试验段基本情况

项目试验区位于新疆阜康某大型灌区, 该地区属季节性冻土区, 最大平均冻土深度 1.45 m, 实测历年最大冻深 1.72 m。根据土工试验, 土中粒径小于 0.075 mm 的土粒质量大于总质量的 10%, 属于冻胀性土。试验区多年平均气温 6.5℃, 极端最低气温 -25~-32.2℃。

试验段总长 50 m, 渠道为 E-W 走向的梯形半填半挖刚柔混合衬砌渠道, 底宽 4.0 m, 渠道深 3.0 m, 边坡系数  $m$  为 1.5, 纵坡 1/300。根据土工试验结果, 渠基为低液限粉土, 天然含水率 16%~23%, 密度 1.51~1.65 g/cm<sup>3</sup>, 孔隙比 0.69~0.80, 潮湿-饱和, 属密实状态, 塑性指数 5.8~6.4, 液性指数 0.53~0.82, 渗透系数  $2.25 \times 10^{-4} \sim 8.49 \times 10^{-4}$  cm/s, 压缩系数 0.25~0.31 MPa<sup>-1</sup>, 压缩模量 6.0~7.3 MPa, 为中等压缩性, 凝聚力 6.2~11.6 kPa, 内摩擦角 16.5°~22.3°。该土层透水性中等, 防渗作用一般。地下水在渠底 10 m 以下。

### 1.2 试验段设计、观测设施布置和观测方法

试验段在保持原土渠水面高程和渠道纵坡比降不变的原则下, 采用刚柔混合衬砌结构 (厚度 12 cm 的刚性混凝土衬砌板+柔性复合土工膜) 进行衬砌。复合土工膜的物理力学性能指标见表 1。

表 1 复合土工膜的物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of composite geo-membrane

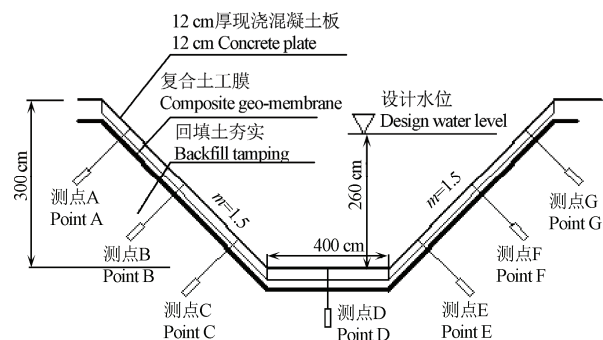
复合土工膜规格 Specification of composite geo-membrane	单位面积 质量 Weight per unit area/ (g·m <sup>-2</sup> )	纵向抗 拉强度 Endwise tensile strength/ (kN·m <sup>-1</sup> )	横向抗拉 强度 Transverse tensile strength/ (kN·m <sup>-1</sup> )	刺破 强度 Lance strength/ (kN·m <sup>-1</sup> )	极限 伸长率 Ultimate elongation/ %
200 g·m <sup>-2</sup> /PE0.5/ 200 g·m <sup>-2</sup>	980	51.6	54.3	1.15	142

注: 复合土工膜规格为 200 g·m<sup>-2</sup>/PE0.5/ 200 g·m<sup>-2</sup>, 由 200 g·m<sup>-2</sup> 聚酯长丝针刺土工布和厚 0.5 mm 的聚乙烯光面土工膜热合而成。  
Note: Specification of composite geo-membrane is 200 g·m<sup>-2</sup>/PE0.5/ 200 g·m<sup>-2</sup>, its thermal synthesis of 200 g·m<sup>-2</sup> polyester geo textiles and 0.5mm polyethylene geotechnical membrane.

根据稳定的土渠基础和现有的分析, 混凝土衬砌板为等厚板, 厚度 12 cm, 设计标号为 C20, 弹性模量  $2.29 \times 10^4$  MPa。渠道坡板和底板下铺设复合土工膜, 采用现浇混凝土护坡。渠道边坡采用蛙式打夯机夯实, 干密度控制在 1.6 g/cm<sup>3</sup> 以上, 土壤含水率 16%~23%。渠道设计流量 21 m<sup>3</sup>/s, 加大流量 26 m<sup>3</sup>/s。刚柔混合衬砌渠道的断面如图 1 a 所示。

在冻胀试验开始前, 复合衬砌渠道试验段在设计水位条件下运行, 使试验段达到输水渠道的实际情况。复合衬砌渠道测点纵向布置和测点平面布置如图 1b 所示。

气温采用设置在渠道岸边百叶箱中的温度计、最高和最低温度计每日进行观测。

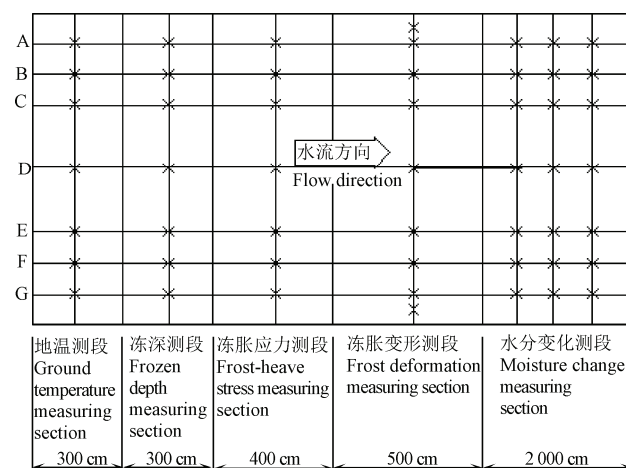


注:  $m$  为边坡系数。

Note:  $m$  is slope coefficient of trapezoidal canal.

a. 混合衬砌梯形渠道断面形式及测点布置

a. Cross section of trapezoidal canal with concrete and composite geo-membrane and plane layout of observation points



注: “x”表示测点位置, 地温测段、冻深测段和冻胀应力测段设置 7 个测点; 冻胀变形测段设置 9 个测点。水分变化测段的测点布置与地温测段相同, 测点个数随观测时间确定。

Note: “x” means measuring points, the ground temperature measuring section, frozen depth measuring section and frost-heave stress measuring section set up 7 points. Frost deformation measuring section set up 9 points. The measuring points of moisture change were same with the ground temperature. The number of measuring point was determined by time.

b. 复合衬砌渠道测点纵向布置和测点平面布置

b. Plane layout of observation points of rigid-soften composite canal

图 1 混合衬砌梯形渠道断面形式及测点平面布置

Fig.1 Cross section of trapezoidal canal with concrete and composite geo-membrane and plane layout of observation points

地温测段长 300 cm, 阳坡布置 3 个测点, 分别为 A、B、C, 渠底布置一个测点 D, 阴坡布置 3 个测点, 分别为 E、F、G。每个测点布置 1 台 WS-4 型多侧点遥感土壤温度计, 可同时监测不同深度处的地温。地温数据每日进行观测, 记录每个测点的日极值地温。

渠基土壤冻深测段长 300 cm, 测点布置和个数与地温测段相同, 如图 1b 所示, 共计 7 个测点。冻深采用与测点平面垂直埋设的 DTM-2 型冻土器在冻结期每日进行观测。根据观测的冻深数据, 绘制混合衬砌渠道不同测点冻深过程线。

渠道冻胀应力测段长 400 cm, 测点设置与个数与冻深测段相同。冻胀应力采用应变式荷重传感器自冻结前期至融化后每日进行观测, 每个测点的观测面积为 4.0 m<sup>2</sup>。

复合衬砌渠道冻胀变形测段长 500 cm, 分别在渠底中心、1/3 设计水位点、2/3 设计水位点、设计水位点及

渠道超高保护层中点埋设观测点, 如图 1b 冻胀变形测段所示, 冻胀变形测段共计 9 个测点。冻胀变形量采用预埋固定件使用水准仪和经纬仪分别测定水平位移和垂直位移量。由水准仪和经纬仪分别测量垂直和水平位移量, 经矢量合成表征渠坡径向位移, 也即复合衬砌体冻胀量。

渠基土壤水分变化测段长 2 000 cm, 测点位置与地温测段相同, 如图 1b 所示, 测点个数根据观测时间确定。采用土钻在混合衬砌结构下 0~120 cm 范围内不同深度处取土样, 用烘干法测定土壤的含水率, 每次测完后, 用当地土料回填。为了使含水率的测定结果尽量与实际情况接近, 下次取样距上次取样距离 30~50 cm。

## 2 结果与分析

### 2.1 气温及不同深度地温变化规律

经过历时 140 d 的 (2013 年 11 月 5 日—2014 年 3 月 28 日) 完整冻融周期的原型观测, 试验区极值气温过程线如图 2 所示。极值气温总体上经历了两次波谷和一次波峰, 第 1 次波谷出现在 2014 年 1 月 8、9、10 日, 最低温度为  $-25^{\circ}\text{C}$ , 此后气温有所上升, 气温回升至 2014 年 1 月 30 日的  $-11^{\circ}\text{C}$ , 然后气温又逐渐下降, 在 2014 年 2 月 18 日达到最低值  $-24^{\circ}\text{C}$ , 此后气温再次波动式回升。在 2014 年 3 月 19 日最低气温达到  $1^{\circ}\text{C}$ 。纵观整个冻融周期, 气温总体呈现波动变化趋势。

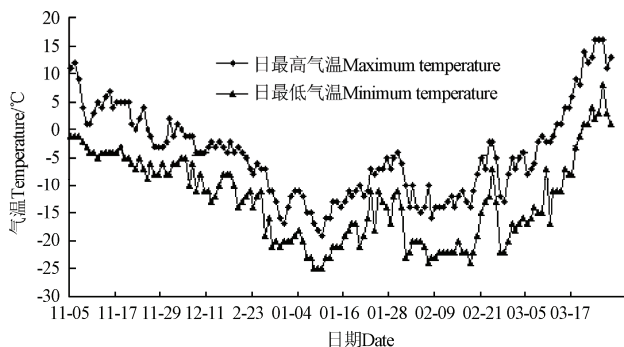


图 2 试验区最高、最低气温变化曲线

Fig.2 Maximum and minimum temperature change in experimental area

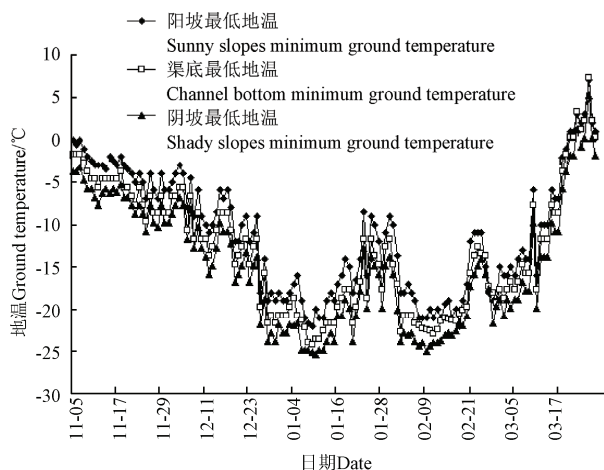


图 3 刚柔混合衬砌渠道不同部位最低地温过程线

Fig.3 Minimum ground temperature of trapezoidal canal with concrete and composite geo-membrane

图 3 给出了刚柔混合衬砌渠道不同部位最低地温变化曲线。从图 3 可以看出, 阴坡地温最低, 阳坡地温最高, 阴坡最低地温为  $-25^{\circ}\text{C}$ , 阳坡最低地温为  $-21^{\circ}\text{C}$ 。混合衬砌渠道不同部位的最低地温变化曲线与气温过程线有相同的变化趋势。即随着气温的降低和升高, 混合衬砌渠道不同部位的最低地温也随之降低和升高。对比图 2 和图 3, 不同部位的最低地温也经历了两次波谷和一次波峰, 而最低地温的第一次波谷出现在 2014 年 1 月 10、11 日。不同部位的最低地温过程线与日最低气温过程相接近。对比气温和最低地温的变化过程线, 可以发现最低地温的变化略滞后于气温的变化。

### 2.2 混合衬砌渠道冻深、冻胀量及冻胀力变化

冻深采用与测点平面垂直埋设的 DTM-2 型冻土器在冻结期每日进行观测。刚柔混合衬砌渠道不同测点的冻深过程线如图 4 所示。

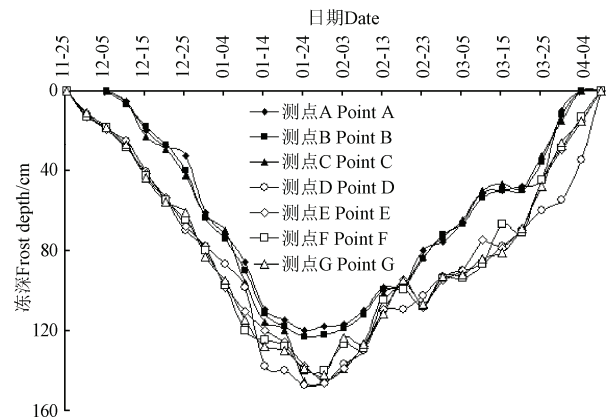


图 4 刚柔混合衬砌渠道不同测点冻深过程线

Fig.4 Measuring point frost depth of rigid-soften composite trapezoidal canal

由于刚柔混合衬砌渠道不同部位最低地温有所差异, 冻深分布表现为渠底及阴坡较大, 阳坡较小。冻深的发展趋势主要受气温和最低地温的变化影响。气温下降, 最低地温下降, 冻深持续增加; 当最低地温连续下降, 渠底冻深为 138 cm; 当最低地温回升时, 冻深有所减小。随着最低地温的再次下降, 冻深再次增大, 最大值为 147.2 和 146.2 cm, 发生在渠道底部和阴坡 E 点。随着最低地温的逐渐回升, 最低地温回升至正温度时, 冻深随之消失。不同部位不同测点冻深的最大值见表 2。

冻胀变形量采用预埋固定件水准仪和经纬仪分别测定水平位移和垂直位移量。在距离渠道 10 m 处设置深度为 1.8 m 的基准高程点。埋设深度在实测历年最大冻深 (1.72 m) 以下, 保证在测定水平位移和垂直位移时不会因冻拔影响而导致测量结果的误差。

使用经纬仪观测时, 在渠道中心选择 3 个固定点作为仪器的安放点, 每次观测时, 经纬仪都要准确安放在固定点处, 逐次观测特征点角度并逐一进行记录。刚柔混合衬砌渠道不同部位不同测点冻胀变形量的最大值见表 2。



表 2 渠基土壤冻深、冻胀量及冻胀力观测值

Table 2 Observation values of frozen depth, amount of frost heaving and frost-heaving force of cancel base

观测位置 Observation position	观测点 Observation point	冻深 Frost depth/mm	冻胀量 Frost heaving amount/mm	冻胀应力 Frost-heave stress/kPa
阳坡 Sunny slope	A	1 200	65	123
	B	1 235	41	154
	C	1 200	56	153
渠底 Bottom	D	1 472	112	163
阴坡 Shady slope	E	1 462	131	178
	F	1 400	102	105
	G	1 420	98	123

注：由于冻胀变形测段共设置了 9 个测点，渠道阴坡、阳坡超高保护层中点观测点的冻胀变形量较小，最大值为 1.1cm。在试验时没有布置与之相对应的冻深和冻胀应力测点，因此这两点的冻胀变形量不参加结果分析。  
Note: Frost deformation measuring section set up 9 points, the frost deformation of protective layer of canal is small, the maximum value is 1.1cm. In prototype test not layout frozen depth and frost-heave stress points, so the frost deformation of this two points exclude in result analysis.

冻胀应力采用荷重传感器自冻结前期每日进行观测。在试验尺寸为 4.0 m<sup>2</sup> 面积上测得的混合衬砌渠道的最大冻胀应力为 178 kPa，位于阴坡距离渠底向上 1/3 处，渠道底部的冻胀应力次之，达到 163 kPa。表 2 中列出了渠道不同部位不同测点冻胀应力的最大值。

混合衬砌渠道阴坡 E 点和渠道底部 D 点的冻胀变形量最大，分别为 13.1 和 11.2 cm，造成了衬砌结构的向上隆起。其次是阴坡的 F、G 两个测点冻胀变形，分别是 10.2 和 9.8 cm。阳坡的冻胀变形量较小。随着最低地温的逐渐上升，冻胀变形量虽然有所减小，但仍有部分残留变形量。

通过原型渠道的冻胀观测表明，渠基土壤的冻胀对复合衬砌结构产生了冻胀应力，冻胀应力的变化规律与最低地温变化规律相似。复合衬砌渠道的阴坡 E 和底部 D 点的冻胀应力较大，分别为 178 和 163 kPa，阳坡的冻胀应力较小。冻胀应力的峰值出现在最低地温较低的时间和部位，大概处于渠道阴坡底部向上 1/3 的位置。冻胀应力随着最低地温的回升逐渐减小，最终处于一个稳定的负值，这是由于最低温度回升渠基土壤融化沉降引起的。

### 2.3 渠基土壤水分变化

水分在渠道冻胀过程中是一个核心因素，正是由于水分的不断变化，才引起了渠基土体的不均匀冻胀，造成了衬砌体的冻胀破坏。为了探明刚柔混合衬砌渠道渠基不同部位不同深度处的水分在整个冻融周期的变化规律，采用土钻在混合衬砌结构下 0~120 cm 范围内不同深度处取土样，用烘干法测定土壤的含水率，并与初始含水率进行比较，分析不同测点水分的迁移率，不同测点初始含水率见表 3。图 5 给出了冻结期混合衬砌渠道不同测点含水率沿渠基土壤深度的变化趋势。从图中可以看出，在冻结期，阴坡、阳坡和渠底水分变化趋势相同。在 0~60 cm 土层范围内含水率随深度增加而增大，60~120 cm 土层范围内含水率随深度增大而逐渐减小。水分在 60 cm 深度范围内聚集，形成了渠基土壤的冻结锋面，

这也是渠道底部和阴坡的冻胀变形和冻胀应力较大的原因。

表 3 渠基土壤初始含水率与土壤深度 60 cm 处水分变化

Table 3 Initial water content and amount of soil moisture transfer in 60 cm depth of cancel base soil

观测位置 Observation position	观测点 Observation point	初始含水率 Initial water content/%	冻结期迁移率 Change rate in freezing period /%	融化期迁移率 Change rate in Thawing period /%
阳坡 Sunny slope	A	21	+2.1	-6.2
	B	23.5	+2.7	-3.7
	C	24	+3.3	-4.1
渠底 Bottom	D	23	+13.2	-11.0
阴坡 Shady slope	E	21	+3.5	-1.8
	F	23	+2.1	-1.1
	G	23.5	+1.8	-0.9

注：迁移率=冻结期(融化期)含水率-初始含水率。“+”表示水分向上迁移；“-”表示水分向下消散。

Note: water migration = moisture content of freezing period (thawing period) - initial water content. “+” means water upward; “-” means water downward.

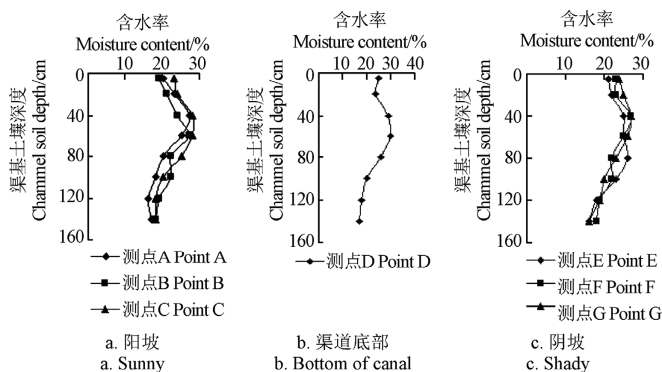


图 5 冻结期不同测点含水率沿深度的变化趋势

Fig.5 Variation of soil water content with depth during freezing period of different points

表 3 给出了混合衬砌渠道在冻结期与融化期渠基土壤含水率的迁移值。冻结期渠基土壤水分变化量(初始含水率与冻结期含水率之差)最大值为+13.2%，发生在渠道底部 D 点，“+”表示水分向上迁移。融化期水分变化量(初始含水率与融化期含水率之差)最大值为-11.0%，也发生在渠道底部 D 点，“-”表示水分向下消散。

### 2.4 柔性复合土工膜的变形特征和强度变化

复合土工膜作为一种柔性的防渗抗冻胀材料，具有适应变形的特点。经过一个冻融期的运行，在试验段不同部位随机选取复合土工膜的试验单元，在阳坡、渠道底部、阴坡随机各取 3 个单元，采用 TZY-1 型土工合成材料综合测定仪进行强度和变形量的检测。运行一个冻融周期后，复合土工膜的残余强度和伸长率变化值见表 4。

通过检测发现，经过一个冻融周期的运行，在冻胀力的作用下，复合土工膜的纵向抗拉强度最大损失值为 4.9 kN/m，损失 9.4%，横向抗拉强度最大损失值为 4.4 kN/m，损失 8.1%；伸长率最大减小值为 8%，损伤率为 5.6%。材料强度和极限伸长率仍然保持在 90%以上，

复合土工膜的强度和变形损失值较小<sup>[16-17]</sup>, 可视为可靠而不影响工程的稳定。

表 4 复合土工膜的残余强度和变形

Table 4 Remaining strength and deformation of composite geo-membrane

单元部位 Active extract unit	试验单元 Experimental unit	纵向抗拉强度 Endwise tensile strength/ (kN·m <sup>-1</sup> )	横向抗拉强度 Transverse tensile strength/ (kN·m <sup>-1</sup> )	极限伸长率 Ultimate elongation/ %
阳坡单元 Sunny element	1	48.3	51.2	138
	2	47.2	52.3	136
	3	48.7	50.1	139
底部单元 Bottom element	4	48.3	51.2	133
	5	47.2	52.3	135
	6	46.7	49.9	134
阴坡单元 Shady element	7	47.4	50.3	136
	8	46.7	50.3	135
	9	48.3	50.4	136

### 3 讨 论

由于混合衬砌渠道的走向不同, 各部位的温度场也不同, 导致混合衬砌渠道各部位的冻胀变形也不同。突出表现在阴坡、渠道底部冻胀变形较大, 阳坡冻胀变形较小, 这与刚性衬砌渠道的变形情况一致<sup>[18]</sup>。由于冻胀作用, 渠基发生隆起, 造成混凝土坡板向上抬起, 引起混凝土衬砌板的错位裂缝, 造成渠道的冻胀破坏。其不同点在于, 刚性衬砌渠道冻胀破坏之后, 加大了渠道的渗漏量, 使渠基土层的含水率进一步增加, 从而加大了渠道的冻胀破坏, 最终导致混凝土衬砌结构发生大面积冻胀破坏。而刚柔混合衬砌渠道具有“双防”功能, 既达到防水的目的又起到不冻或冻胀而不破坏的效果<sup>[15]</sup>。因此, 刚柔混合衬砌结构抗冻胀效果非常明显, 是一种更为有效的渠道抗冻胀结构<sup>[13]</sup>。

原型观测表明: 刚柔混合衬砌渠道冻胀变形量的最大值发生在阴坡和渠道底部, 造成了衬砌结构的向上隆起。这与混凝土衬砌渠道的原型观测结果相一致<sup>[18]</sup>。

根据文献[8, 10-11], 影响渠道冻胀的主要因素是气温、地温、渠基土壤的含水率和土质。气温和地温的负温值越高, 土体的冻胀量也就越大; 渠基土壤含水率越大, 土体冻胀量也越大。反复的季节性冻融会使渠基含水率减小<sup>[8]</sup>。土体中的水分会随着土体温度的变化而发生迁移。在冻结期, 渠基土壤水分向负温较大处迁移聚集, 随着负温的持续增大, 土体中的水分向负温方向迁移聚集并冻结。通过原型试验发现, 从图 6 中可以看出, 冻结期渠基土壤的水分在 60 cm 深度范围内聚集, 形成了渠基土壤的冻结锋面, 水分持续向冻结锋面迁移, 最大值发生在渠道底部 D 点, 迁移率为 13.2%。其次是阴坡的 E 点。融化期, 水分逐渐向下消散, 变化量最大值为 11.0%, 也发生在渠道底部 D 点。冻结期, 随着气温、最低地温的持续降低, 水分向冻结锋面持续迁移并冻结,

导致冻结锋面所处部位的冻胀变形量最大。渠道阴坡的最大径向位移为 13.1 cm, 位于阴坡底部向上 1/3 的处。渠道底部的冻胀变形量为 11.2 cm。这两处的冻胀应力也最大, 分别为 178 和 163 kPa。

不论是刚柔混合衬砌渠道, 还是刚性混凝土衬砌渠道, 渠基土壤的地温、冻深、冻胀量、冻胀力及其水分的迁移均受控于气温这个最主要的因素, 各因素之间既相互作用, 又互为因果<sup>[8]</sup>。而渠基土壤的地温、水分和是否为冻胀性土是渠道冻胀破坏的核心因素。

### 4 结 论

通过一个完整冻融周期的原型观测, 并对观测数据进行了分析, 得到以下主要结论:

1) 分析具体渠道原型观测成果, 在冻结期, 刚柔混合衬砌渠道的衬砌结构整体向上抬起, 这是由于渠道底部衬砌体向上的冻胀变形和坡板的径向冻胀变形相互作用的结果。

2) 混合衬砌渠道阴坡和渠道底部的冻胀变形量最大, 造成了衬砌结构的向上隆起。渠道阴坡的最大径向位移为 13.1 cm, 位于阴坡底部向上 1/3 的处。渠道底部的冻胀变形量为 11.2 cm。这两处的冻胀应力也最大, 分别为 178 和 163 kPa。

3) 季节性冻融对刚柔混合衬砌梯形渠道渠基土壤水分有向上聚集和向下消减的运移作用。冻结期, 渠基土壤 0~60 cm 深度范围内含水率随深度增加而增大, >60~120 cm 深度范围内的含水率随深度增大而逐渐减小。

4) 经过一个冻融周期的运行, 在冻胀力的作用下, 复合土工膜的纵向、横向抗拉强度和极限伸长率仍然保持在 90%以上, 复合土工膜的强度和变形损失值较小。

### [参 考 文 献]

- [1] 黄英豪, 蔡正银, 张晨, 等. 渠道冻胀离心模型试验设备的研制[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(4): 615—621.  
Huang Ying hao, Cai Zheng yin, Zhang Chen, et al. Development of centrifugal model test facility for frost-heave of channels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(4): 615—621. (in Chinese with English abstract)
- [2] 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: 中国水利电力出版社, 2006.
- [3] 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 Shuang, Wang Zheng zhong, Gao Lan lan, 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)
- [4] Newman G P, Wilson G W. Heat and mass transfer in unsaturated soils during soil freezing[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(1): 63—70.

- [5] 中国灌溉排水发展中心. SL18-2004, 渠道防渗工程技术规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [6] 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)
- [7] 宋清林, 何武全, 李根, 等. 混凝土衬砌渠道保温防冻胀技术研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(4): 43—48.  
Song qinglin, He wuquan, Li gen. The research on insulation and frost Heave control for concrete lining canal[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(4): 43—48. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李学军, 费良军, 李改琴. 大型 U 形混凝土衬砌渠道季节性冻融水热耦合模型研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 13—17.  
Li Xue jun, Fei Liang jun, Li Gai qin. Model of coupled heat-fluid transport of U-shape canal lining with concrete seasonal freezing and thawing stage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(1): 13—17. (in Chinese with English abstract)
- [9] 孙杲辰, 王正中, 王文杰, 等. 梯形渠道衬砌体冻胀破坏断裂力学模型及应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 108—114.  
Sun Gao chen, Wang Zheng zhong, Wang Wen jie, et al. Frost heave fracture mechanical model for concrete lining trapezoidal canal and its application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(8): 108—114. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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, 2008, 20(3): 24—29.  
Wang Zheng zhong. Establishment and application of mechanics model of frost heaving damage of concrete lining trapezoidal open canal[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 20(3): 24—29. (in Chinese with English abstract)
- [11] 石娇, 王正中, 张丰丽, 等. 高地下水位弧底梯形混凝土衬砌渠道冻胀断裂破坏力学模型及应用[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43(1): 213—219.  
Shi Jiao, Wang Zheng zhong, Zhang Feng li, et al. Development and application of frost-heaving fracture damage mechanical model for concrete lining channel with arc-bottom trapezoidal at high groundwater level[J]. Journal of Northwest A&F University Nat. Sci. E, 2015, 43(1): 213—219. (in Chinese with English abstract)
- [12] 安鹏, 刑义川, 张爱军, 等. 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(增刊 2): 257—271.  
An Peng, Xing Yi chuan, Zhang Ai jun, et al. Study of design method and numerical simulation for anti-frost heave cushion of canal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Supp.2): 257—271. (in Chinese with English abstract)
- [13] 刘旭东, 王正中, 闫长城, 等. 基于数值模拟的双层薄膜防渗衬砌渠道抗冻胀机理探讨[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 29—35.  
Liu Xu dong, Wang Zheng zhong, Yan Chang cheng, et al. Exploration on anti-frost heave mechanism of lining canal with double films based on computer simulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2011, 27(1): 29—35. (in Chinese with English abstract)
- [14] 杨建平, 寿伟, 王铁强. 浅论复合土工膜在南水北调工程中的应用技术[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(3): 109—111.  
Yang Jian ping, Shou Wei, Wang Tie qiang. Discussions on the application of composite geo-Membrane in the South-to-North water diversion project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(3): 109—111. (in Chinese with English abstract)
- [15] 宋玲, 余书超. 季节冻土区防水卷材防渗渠道的特种衬砌方案研究[J]. 冰川冻土, 2009, 31(1): 124—129.  
Song Ling, Yu Shu chao. Researches on the special scheme for canal Liners with rolled waterproof pad in seasonal frozen regions[J]. Journal of glaciology and geocryology, 2009, 31(1): 124—129. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王广月, 李华鑫, 李艳琴. 复合土工膜蠕变性能的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1599—1603.  
Wang Guanyue, Li Hualuan, Li Yanqin. Experimental research on creep properties of composite geo-membrane[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1599—1603. (in Chinese with English abstract)
- [17] 南京水利科学研究院/中国土工合成材料工程协会. SL/T123-1999. 土工合成材料测试规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [18] 李安国, 陈瑞杰, 杜应吉, 等. 渠道冻胀模拟试验及衬砌结构受力分析[J]. 防渗技术, 2000, (6)1: 5—16.  
Li An guo, Chen Ruijie, Du Yingji, et al. Frost heaving numerical stimulation of canal and analysis of force lining structure[J]. Technique of seepage control, 2000, 6(1): 5—16. (in Chinese with English abstract)

## Test for frost heaving damage mechanism of rigid-soften composite trapezoidal canal in seasonally frozen ground region

Jiang Haibo, Tian Yan

(College of Water & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

**Abstract:** In the area of seasonal frozen soil in North China and Northwest, there exists massive and serious frost-heave damage of concrete lining canal. Frost-heave damage is the main reason for the channels. In this paper, the prototype experiments were conducted in order to explore the frost-heave mechanism of rigid-soften composite canal in the irrigation area of high-cold region. The frost deformation the soil moisture variation of the trapezoidal canal lined with concrete and composite geo-membrane, and especially the rules of frost-heave deformation and the deformation features of composite geo-membrane were further systematically studied. The experiment followed the leading thought of suiting and reducing the frost-heave destruction, chose the trapezoidal canal lined with infiltrating structure and integrated rigidity materials as typical experiment segment, and collected the freeze index of various canal lining frameworks; the experiment referred to the advanced method, and adopted the new material. The experiment section of observation prototype was 50 meters long. The measuring section for ground temperature was 3 meters long, and the temperature was measured by the digital thermometer. The measuring section for freeze depth was 3 meters long, measured by the DTM-2 frozen soil apparatus. The section for frost-heave stress was 4 meters long, measured by the strain sensor. The section for frost deformation was 5 meters long, measured by the electronic level and the electronic theodolite. The section for foundation moisture was 20 meters long, and the foundation moisture was measured by the drying method. Prototype test data were obtained through the observation every day. The observation objects in the test included air temperature, ground temperature, foundation moisture, freeze depth, frost deformation and frost-heave stress. The frost-heave mechanism of trapezoidal canal lined with concrete and composite geo-membrane was studied in the prototype experiment, as well as the soil moisture movement on canal base during seasonal freezing-thawing stage. The variation law of frozen depth and frost-heave deformation was derived from soil moisture movement, freezing temperature and frost depth. Based on the observed data in the prototype experiment of the trapezoidal canal lined with concrete and composite geo-membrane under the condition of freezing-thawing cycle, the ground temperature change, the rules of frost-heave deformation and the distribution of normal and tangential frost-heave force were analyzed. The results showed that, the frost-heave amount had a maximum value of 13.1 and 11.2 cm respectively at the site of one third from the bottom on shady slope and at the bottom of trapezoidal canal, which caused lining structure of the canal to rise. During the freezing period, the soil moisture content in the depth of 0-60 cm increased with the increasing of the depth, while that in 60-120 cm decreased with increasing of the depth. The maximum value of water migration and variation was 13.2%, which occurred in the bottom of the canal. After one freeze-thaw cycle, the strength and deformation quantity of composite geo-membrane were still maintained above 90%, so it could fully utilize the features of frost-heave resistance and adaptive deformation of composite geo-membrane. The study shows that the prototype experiment of the canal can provide the reference and the scientific basis for the engineering design of the lining canal with concrete and composite geo-membrane and the mechanics computation in seasonal frost region.

**Key words:** canals; frozen soils; moisture; rigid-soften composite canal; frost-heaving mechanism; frost heaving amount; frost-heave stress; moisture migration