

DOI: 10.11779/CJGE201408011

# 土工袋防渠道冻胀模型试验研究

李 卓<sup>1, 2</sup>, 盛金保<sup>1, 2</sup>, 刘斯宏<sup>3</sup>, 何勇军<sup>1, 2</sup>, 李亚军<sup>4</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水利部大坝安全管理中心, 江苏 南京 210029;  
3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 4. 代尔夫特理工大学土木学院, 代尔夫特)

**摘要:** 为研究土工袋在寒冷地区的防渠道冻胀效果, 开展了冻融循环作用下土工袋处理渠道和常规渠道模型试验, 研究了土工袋处理渠道和常规渠道的冻胀量、融沉量、含水率和温度随时间的变化规律。试验结果表明: 冻融循环作用下土工袋处理渠道防冻胀效果显著, 同时揭示了土工袋防渠道冻胀机理, 即土工袋通过抑制毛细水、薄膜水上升、加筋作用达到防冻胀效果, 为寒区渠道防冻胀提供理论依据。

**关键词:** 冻融循环; 土工袋; 模型试验; 渠道防冻胀

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)08-1455-09

作者简介: 李 卓(1979-), 男, 宁夏隆德人, 博士后, 主要从事土石坝工程、水工建筑物防冻胀等方面的研究工作。  
E-mail: zhuoli@nhri.cn。

## Model tests on frost heave-prevented channels using soilbags

LI Zhuo<sup>1, 2</sup>, SHENG Jing-bao<sup>1, 2</sup>, LIU Si-hong<sup>3</sup>, HE Yong-jun<sup>1, 2</sup>, LI Ya-jun<sup>4</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
4. Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands)

**Abstract:** In order to study the effectiveness of channels of frost heave prevention using soilbags in cold regions, a series of model tests on the soilbag-reinforced channels and traditional channels are conducted in the laboratory. The variation patterns of frost heave, thawing settlement, moisture content and temperature of the soilbag-reinforced channels and traditional channels are studied. The test results show that the soilbag-reinforced channels have significant effectiveness of frost heave prevention. The frost heave prevention mechanism of channels using soilbags is revealed. The theory of frost heave prevention is explained by comparing the soilbag-reinforced channels with the traditional channels due to the effect of soilbags, namely reinforcement, which is achieved by the small differential deformation and inhibition of capillary water and film water migration through soilbags. Therefore, the soilbags can prevent the frost heave of channels. This study may provide references for the frost heave prevention of channels in cold regions.

**Key words:** freeze-thaw cycle; soilbags; model test; frost heave prevention of channel

## 0 引言

目前, 南水北调工程东线、中线工程正在实施, 工程涉及 7 省(直辖市), 受水区为京、津、冀、鲁、豫、苏 39 个地级以上城市, 渠道及其建筑物是南水北调东线、中线工程的主要组成部分。工程实施的大部分地区处在北方寒冷地区, 渠道及其建筑物冻胀成为今后工程运行和维修的主要问题, 防冻胀研究的紧迫性比以往更突出。研究表明土体、温度和水分是产生冻胀的三要素, 渠道及其建筑物冻胀是由土体冻胀所致<sup>[1]</sup>, 因此, 合理的防冻胀技术对保证南水北调渠道的输水安全、受水区生产生活和发挥工程效益具有十分重要的意义。自 20 世纪 40 年代, 国内学者外开展

了渠道防冻融冻胀试验研究, 目前寒冷地区渠道防冻胀主要措施为“适应、回避、消减或消除冻胀”; 防冻胀主要以单一结构型式、刚性材料以及换填土为主, 防冻胀效果差, 所以寻找一种在冻胀时适应不均匀变形能力强材料、又能就地利用现场废弃的土料作为防冻胀技术显得尤为重要。目前, 有关渠道防冻胀方面的研究较少, 对防冻胀研究主要集中在公路、铁路和

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAK10B04); 水利部公益性行业科研专项项目(201301033); 国家自然科学基金项目(51309164); 江苏省博士后基金项目(Rq713001); 南京水利科学研究院青年基金项目(Y714009); 南京水利科学研究院博士后基金项目(BH71301)

收稿日期: 2013-10-31

石油管道等工程中。

土工袋加固地基技术是 Matsuoka 等<sup>[2-3]</sup>和刘斯宏等<sup>[4]</sup>在总结“土袋”长期工程应用成果的基础上, 通过大量试验验证和理论研究开发得到的一项岩土新技术, 实现了“土袋”从实践向理论的过渡。Matsuoka 等<sup>[5]</sup>通过室内模型试验, 测试分析了“土袋”对铁路基础承载力的加固效果; Matsuoka 等通过室内及现场试验, 测试分析了“土袋”作为房屋建筑基础及道路基础的抗震效果<sup>[6-8]</sup>; 刘斯宏等<sup>[9]</sup>对南阳膨胀土进行了不同竖向荷载作用下的浸水膨胀变形及其膨胀后试样的强度试验, 得出了抗剪强度指标变化规律的数学拟合式, 并将其应用于土工袋处理膨胀土边坡的稳定分析中, 论证了土工袋处理膨胀土边坡的压重效果。白福青等<sup>[10]</sup>在三维应力状态下分析了土工袋加固原理, 分别以广义 Mises 破坏准则和 Lade-Duncan 破坏准则为理论基础, 推导出土工袋在三维复杂应力作用下的极限抗压强度表达式。并验证了三维土工袋强度公式的计算结果更接近于试验值, 而且其适用范围更广。刘斯宏等<sup>[11]</sup>为预测土工袋加固后软土地基的变形特性, 采用弹塑性有限元法对土工袋加固后的软土地基承载力试验进行了模拟, 将土工袋加筋原理与有限元计算法有机结合, 数值模拟计算值与试验实测值基本一致。李卓等<sup>[12]</sup>等为研究季节性冻土地区冻融循环作用下土工袋防冻胀效果, 对不同冻融循环作用下土工袋和土体进行了室内模型试验, 试验验证了土工袋防冻胀机理及防冻胀效果。

北方寒冷地区引起渠道冻胀破坏的基土冻胀范围为 1.5 m 左右, 因此, 在土工袋处理渠道防冻胀问题中只需考虑将渠道表层 1.5 m 范围用土工袋进行处理并研究其冻胀特性。根据寒冷地区渠道结构特点, 按照一定比例将渠道缩放后进行室内冻融冻胀试验, 将 20 cm×20 cm (长×宽) 土工袋按照一定的顺序放置在渠道边坡表面, 通过室内模型试验研究土工袋处理渠道和常规渠道的冻融冻胀特性及防冻胀效果; 用封闭系统中土工袋冻融冻胀试验模拟填方渠道的冻融冻胀情况, 用开放系统中土工袋冻融冻胀试验模拟挖方渠道的冻融冻胀情况, 本文分别对冻融作用下封闭系统与开放系统中土工袋处理和常规渠道进行了冻融冻胀试验。文中所指的未经土工袋处理渠道为常规渠道, 以下称为常规渠道。

## 1 试验基本情况

### (1) 模型试验概况

本文所取土样为宁夏黏土, 黏土的物理力学性质见表 1, 试验使用的编织袋为聚丙烯材料, 质量为 110

g/m<sup>2</sup>, 编织袋为黑色, 力学特性见表 2, 袋子尺寸为 20 cm×20 cm (经向×纬向), 黏土含水率为 21.1%, 干密度为 1.62 g/cm<sup>3</sup>, 渠道模型坡比 1:1.05, 高 39 cm, 渠底长 57.3 cm, 渠顶长 20 cm, 渠道宽 47 cm。按相同密度制作土工袋处理渠道模型和常规渠道模型, 将 20 cm×20 cm 土工袋按照 1:1.05 坡比依次放置于渠道边坡表面, 在制作土工袋处理渠道时需要使装入的黏土和土工袋保持紧密接触, 同时将相同密度的黏土按照同样的尺寸制成常规渠道模型。然后在土工袋处理渠道模型和常规渠道模型表面铺设土工膜, 为防止冻融循环过程中水分蒸发, 分别在两模型箱内壁均匀涂上一定厚度的凡士林, 以减小常规渠道模型和土工袋处理渠道模型冻胀、融沉时与模型箱内壁的摩擦。

表 1 试样土颗粒组成

Table 1 Grain composition of soils

粒径/mm	含量/%	粒径/mm	含量/%
<0.075	18.1	[0.5, 2.0)	4.9
[0.075, 0.5)	69.5	≥2.0	7.5

表 2 编织袋力学特性

Table 2 Mechanical properties of woven bags

方向	宽 /mm	长 /mm	张力 /kN	最大伸长量 /mm	抗拉强度 /(kN·m <sup>-1</sup> )	延伸率 /%
经向	200	100	3.01	44.66	15.05	44.66
纬度	200	100	4.00	27.77	20.00	27.77

### (2) 试验仪器埋设

模型试验中埋设的主要仪器有温度传感器、位移传感器、取土器。温度传感器从渠道模型顶部向底部纵向布置, 温度传感器共有 4 个, 埋设位置分别为 5, 15, 25, 35 cm 处, 温度传感器与温度采集系统连接; 位移传感器共有 4 个, 渠道模型顶部放置 1 个, 另外 3 个分别沿着渠道边坡对角线方向放置, 使得传感器垂直于渠道边坡表面, 将位移传感器与温度采集系统连接, 温度采集系统和位移采集系统间隔 30 min 收集一次数据。待冻融循环试验结束后, 渠道模型完全融化后用取土器将不同深度的土样取出并用烘干法测得渠道模型不同深度的含水率变化。图 1 为观测仪器布置, 其中, S1, S2, S3, S4 为土工袋处理渠道温度传感器埋设位置, S5, S6, S7 为土工袋处理渠道边坡表面位移传感器位置, S8 为土工袋处理渠道顶部位移传感器位置, B1, B2, B3, B4 为常规渠道温度传感器埋设位置, B5, B6, B7 为常规渠道位移传感器位置, B8 为常规渠道顶部位移传感器位置。

### (3) 冻结过程

按照黏土含水率为 21.1%、干密度为 1.62 g/cm<sup>3</sup> 将土工袋处理渠道模型和常规渠道模型制备后, 将封闭系统中土工袋处理渠道模型和常规渠道模型在-15℃冻结 48 h, 然后在室温下融化 48 h, 以上冻融循环过

程认为是1个冻融循环;此外,开放系统中土工袋处理渠道和常规渠道底部保持2 cm的地下水位。为研究寒冷地区毛细水和薄膜水上升对渠道的冻胀破坏,2个马氏瓶分别与模型箱底部连接,保持在冻结和融化过程中地下水位为2 cm,封闭系统中土工袋处理渠道和常规渠道冻胀模型试验、开放系统中土工袋处理渠道和常规渠道冻胀模型试验装置见图2,渠道试验模型见图3,图3(a)为土工袋处理的渠道模型,图3

(b)为常规渠道模型,在封闭系统与开放系统中对土工袋处理渠道和常规渠道模型分别进行了10次冻融循环试验。

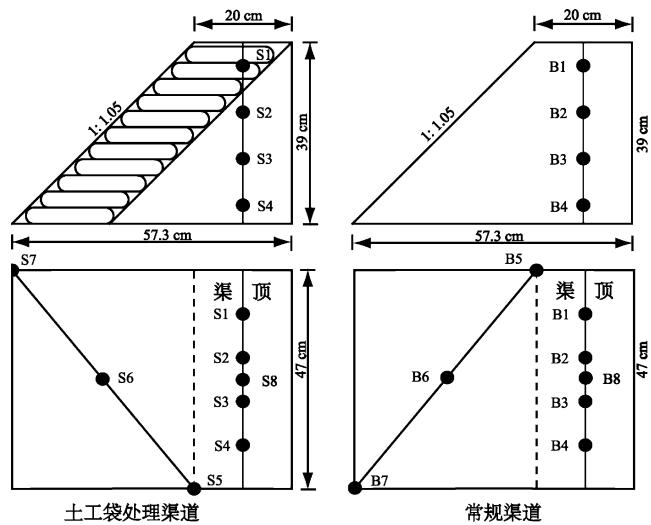


图1 土工袋处理渠道和常规渠道观测仪器布置图

Fig. 1 Layout of measuring instruments for soilbag-reinforced and traditional channels



(a) 模型试验装置



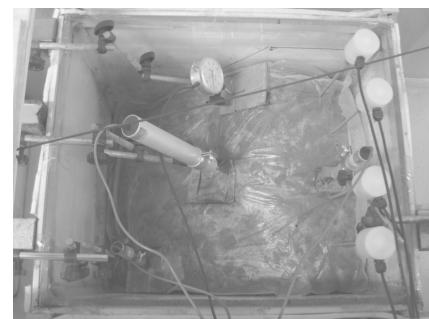
(b) 数据采集系统

图2 渠道模型试验装置

Fig. 2 Diagram of freeze-thaw apparatus



(a) 土工袋处理渠道模型试验



(b) 常规渠道模型试验

图3 土工袋防渠道冻胀模型试验

Fig. 3 Freeze-thaw model tests on soilbag-reinforced and traditional channels

## 2 试验结果及分析

### 2.1 封闭系统中土工袋处理渠道和常规渠道冻胀试验

#### (1) 渠道冻胀量变化

冻胀量是描述土体冻胀变形的基本特征值。北方地区渠道衬砌因其厚度小、自重轻,对冻胀作用十分敏感,当衬砌渠道冻胀量大于允许位移值时,会造成渠道衬砌的冻胀破坏。

图4,5分别为1次冻融循环作用下封闭系统中土工袋处理渠道和常规渠道冻胀量变化情况,两个冻胀模型中各有4个测点。从图3,4可知,48 h土工袋处理渠道和常规渠道冻胀量均达到最大值,最大冻胀量均为渠道模型顶部,土工袋处理渠道冻胀量最大值为0.56 cm,常规渠道冻胀量最大值为0.96 cm, S5, S6, S7冻胀量分别为0.36, 0.30, 0.28 cm, B5, B6, B7冻胀量分别为0.88, 0.90, 0.67 cm。由此可知,就土工袋处理渠道冻胀量小于常规渠道冻胀量,主要是由于封闭系统中土工袋处理渠道的土工袋处理层在负温作用下冻结时袋内的土体冻胀产生冻胀力,此时袋子自身也会产生张力抑制了袋内土体的冻胀,而土工袋处理渠道表层以下的土体在负温作用下的冻胀变化和常规渠道相同。

图6,7分别为10次冻融循环作用下封闭系统中土工袋处理渠道和常规渠道冻胀量的变化情况。从图

可以看出,土工袋处理渠道和常规渠道均产生不同程度的冻胀量,土工袋处理渠道的顶部和常规渠道的顶部最大冻胀量分别为0.58,1.1 cm。与第1次冻融循环作用相比,经历10次不同冻融循环作用后土工袋处理渠道和常规渠道最大冻胀量没发生明显变化。由于封闭系统中土工袋处理渠道和常规渠道无外界水源补给,渠道模型在不同冻融循环作用下模型土体的水分发生了重分布,因此渠道模型在冻融循环作用下的冻胀量无明显变化。

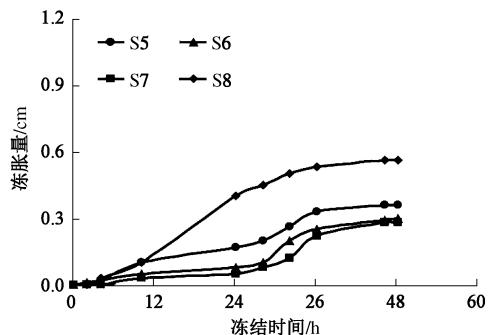


图4 封闭系统中土工袋处理渠道冻胀量与时间关系(1次)

Fig. 4 Variation of frost heave of solilbag-reinforced channel in a closed system with time (1 freeze-thaw cycle)

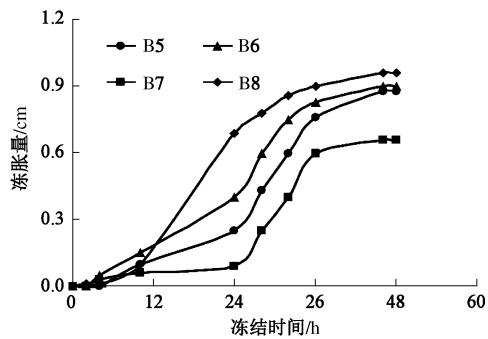


图5 封闭系统中常规渠道冻胀量与时间关系(1次)

Fig. 5 Variation of frost heave of traditional channel in a closed system with time (1 freeze-thaw cycle)

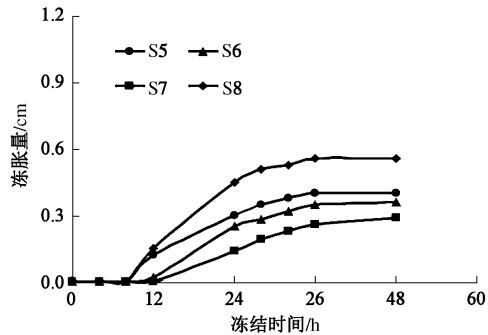


图6 封闭系统中土工袋处理渠道冻胀量与时间关系(10次)

Fig. 6 Variation of frost heave of solilbag-reinforced channel in a closed system with time (10 freeze-thaw cycles)

## (2) 渠道含水率变化

图8为土工袋处理渠道和常规渠道模型试验的含

水率测点分布图,试验前沿着垂直渠道边坡表面方向深度分别为0,10,20,30,39 cm处用取土器取得不同深度的土样然后测其得含水率,然后对10次冻融循环作用后的渠道模型分别沿垂直渠道边坡表面不同深度取样后测相应含水率,以了解冻融循环作用后渠道不同深度含水率的变化。图9,10分别为封闭系统中土工袋处理渠道和常规渠道不同深度的含水率变化,由图可知土工袋处理渠道边坡距表面0,10 cm处的含水率与冻融循环试验前含水率相同,而渠道模型表面13 cm以下土体的含水率发生了明显变化,0~13 cm为土工袋处理渠道表层,常规渠道表面以下土体含水率发生变化与冻融试验前,Miller 第二冻胀理论认为<sup>[13]</sup>,土体在负温作用下冻结时,土体冻胀发生在冻结边缘区内,从冰冻锋面向冰透镜体锋面方向,孔隙冰含量不断增长,未冻水逐渐减薄,形成吸力梯度,使得土体内部水源不断地从冻结区向冰透镜体锋面聚集并冻结成冰而产生冻胀。常规渠道边坡表面以下和土工袋处理渠道边坡表面13 cm以下土体的含水率均发生了变化,常规渠道的土体经历冻融循环作用后水分发生了迁移,使得土体内的水分重分布,从而导致其含水率发生了变化,而土工袋处理渠道表层含水率与冻融试验前含水率相同,由于土工袋内部土体在温度梯度作用下,土体水分无法通过编织袋向相邻土工袋迁移。

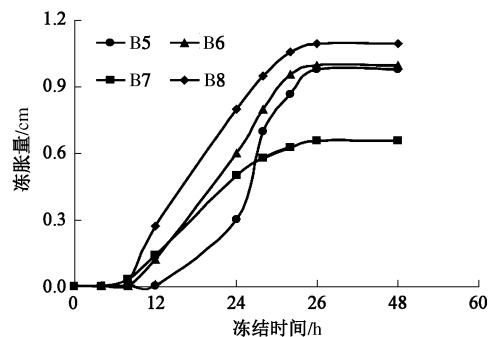


图7 封闭系统中常规渠道冻胀量与时间关系(10次)

Fig. 7 Variation of frost heave of traditional channel in a closed system with time (10 freeze-thaw cycles)

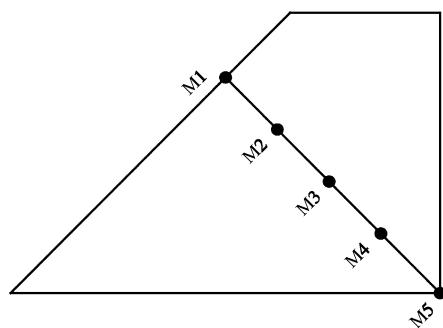


图8 渠道模型试验含水率测点布置图

Fig. 8 Variation of measuring points for moisture content

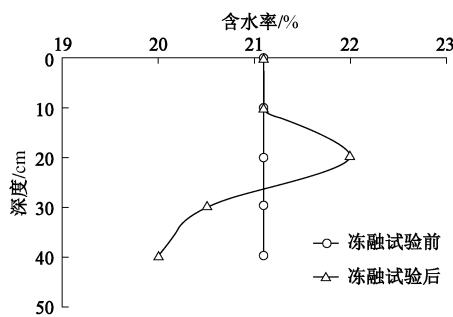


图 9 封闭系统中土工袋处理渠道冻融前后含水率变化

Fig. 9 Variation of moisture content of soilbag-reinforced channel in a closed system before and after freeze-thaw tests

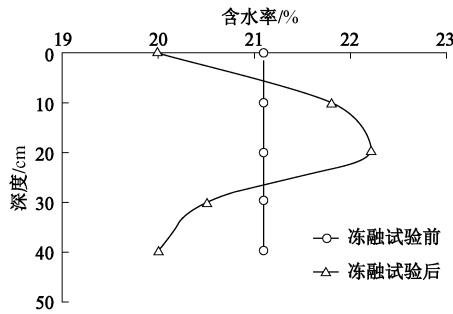


图 10 封闭系统中常规渠道冻融前后含水率变化

Fig. 10 Variation of moisture content of traditional channel in a closed system before and after freeze-thaw tests

### (3) 渠道融沉量变化

图 11, 12 分别为封闭系统中土工袋处理渠道和常规渠道在 1 次冻融作用后的融沉量, 土工袋处理渠道最大融沉量为 0.57 cm, 常规渠道最大融沉量为 1.0 cm, 试验的最大融沉量均发生在渠道模型顶部。与 1 次冻融作用下土工袋处理渠道和常规渠道的冻胀量相比, 其融沉量均大于冻胀量。

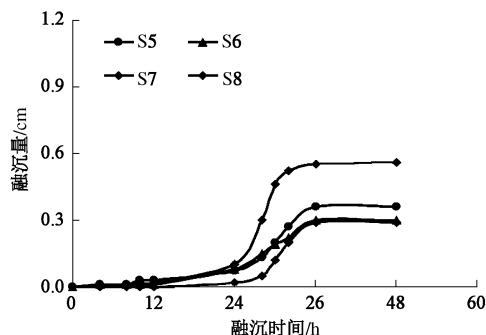


图 11 封闭系统中土工袋处理渠道融沉量与时间关系 (1 次)

Fig. 11 Variation of thawing settlement of soilbag-reinforced channel in a closed system with time (1 freeze-thaw cycle)

图 13, 14 分别为封闭系统中土工袋处理渠道和常规渠道在 10 次冻融循环作用后的融沉量, 土工袋处理渠道的最大融沉量为 0.6 cm, 常规渠道最大融沉量为 1.19 cm, 10 次冻融循环作用后融沉量均大于 1 次冻融

作用下的冻胀量。因此, 土工袋处理渠道和常规渠道在不同冻融循环作用后土体呈现固结, 与实际工程情况中新建渠道的状况相同。

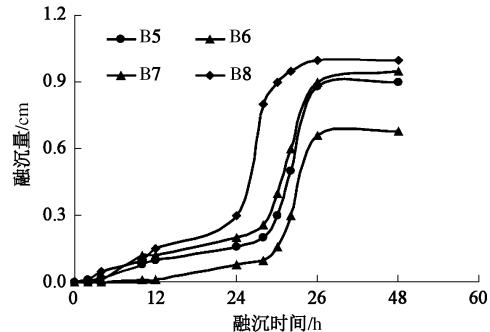


图 12 封闭系统中常规渠道融沉量与时间关系 (1 次)

Fig. 12 Variation of thawing settlement of traditional channel in a closed system with time (1 freeze-thaw cycle)

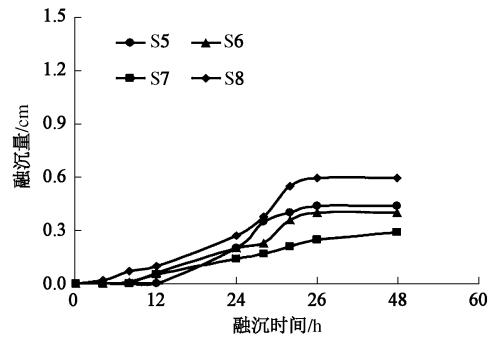


图 13 封闭系统中土工袋处理渠道融沉量与时间关系 (10 次)

Fig. 13 Variation of thawing settlement of soilbag-reinforced channel in a closed system with time (10 freeze-thaw cycles)

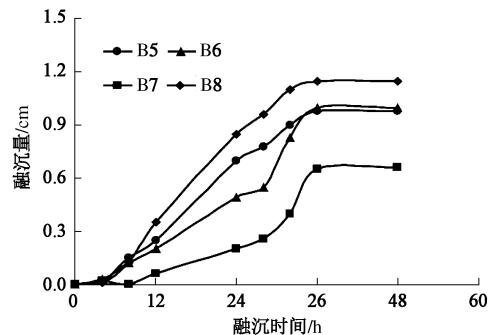


图 14 封闭系统中常规渠道融沉量与时间关系 (10 次)

Fig. 14 Variation of thawing settlement of traditional channel in a closed system with time (10 freeze-thaw cycles)

## 2.2 开放系统中土工袋处理渠道和常规渠道冻胀试验

### (1) 渠道冻胀量变化

开放系统中土工袋处理渠道与常规渠道 1 次冻融作用下的冻胀量变化见图 15, 16, 由图可知土工袋处理渠道和常规渠道的最大冻胀量分别为 0.85, 1.90 cm, 最大冻胀量均在渠道边坡表面中部 S6, B6 处。与封闭系统中土工袋处理渠道和常规渠道的最大冻胀量位置相比, 开放系统中土工袋处理渠道和常规渠道

的冻胀量分别大于封闭系统中土工袋处理渠道和常规渠道的冻胀量。

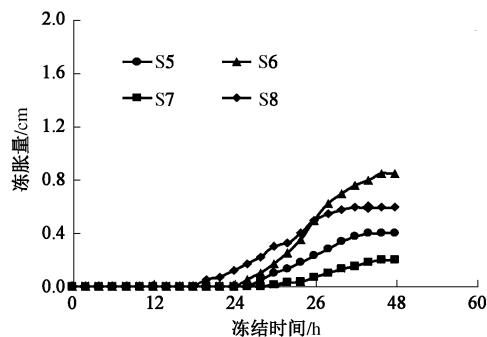


图 15 开放系统中土工袋处理渠道冻胀量与时间关系 (1 次)

Fig. 15 Variation of frost heave of soilbag-reinforced channel in an open system with time (1 freeze-thaw cycle)

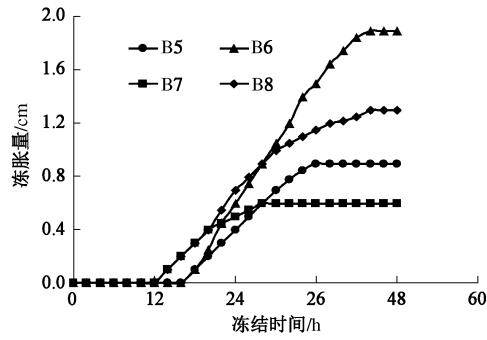


图 16 开放系统中常规渠道冻胀量与时间关系 (1 次)

Fig. 16 Variation of frost heave of traditional channel in an open system with time (1 freeze-thaw cycle)

开放系统中土工袋处理渠道和常规渠道 10 次冻融循环作用下的最大冻胀量见图 17, 18。由图可知, 土工袋处理渠道和常规渠道的最大冻胀量分别为 1.41, 2.10 cm, 由此可见土工袋处理渠道的冻胀量小于常规渠道的冻胀量。由于土工袋处理层的加筋作用和土工袋处理层以下的土体水分迁移引起的冻胀变形作用。10 次冻融循环作用下开放系统中土工袋处理渠道和常规渠道的冻胀量分别大于 10 次冻融循环作用下封闭系统中土工袋处理渠道和常规渠道的冻胀量, 由于冻融循环过程中开放系统渠道模型内有毛细水和薄膜水通过土体上升, 土体中外界水源向冻结前缘带迁移并形成冰透镜体, 由此产生的体积增量是迁移水体积的 1.09 倍, 使得土体的冻胀率达到百分之几十, 是引起土体发生强烈冻胀的主要原因<sup>[1]</sup>。从试验结果可知, 开放系统中土工袋处理渠道和常规渠道最大冻胀量发生在 S6, B6 处, 实际工程中渠道的最大冻胀量位于渠道边坡中部或渠道边坡距离渠底 1/3 位置, 试验结果与实际渠道的最大冻胀量位置相同。

## (2) 渠道含水率变化

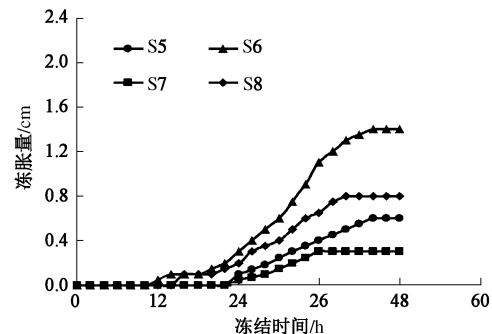


图 17 开放系统中土工袋处理渠道冻胀量与时间关系 (10 次)

Fig. 17 Variation of frost heave of soilbag-reinforced channel in an open system with time (10 freeze-thaw cycles)

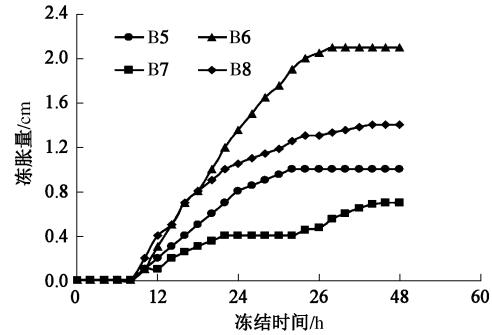


图 18 开放系统中常规渠道冻胀量与时间关系 (10 次)

Fig. 18 Variation of frost heave of traditional channel in an open system with time (10 freeze-thaw cycles)

图 19, 20 分别为经历 10 次冻融循环作用后和 1 次冻融循环作用试验前开放系统中土工袋处理渠道和常规渠道不同深度含水率的变化情况, 渠道模型含水率测点位置与封闭系统中含水率相同, 见图 3。由图 19 可知, 开放系统中土工袋处理渠道边坡表面下 0, 10, 20, 30, 39 cm 处的含水率分别为 21.1%, 21.1%, 22.2%, 23.1%, 32%, 0~13 cm 为土工袋处理层, 土工袋处理层的含水率与 1 次冻融循环试验前的含水率相同, 13 cm 以下含水率与 1 次冻融循环试验前相比有所增加, 试验结果表明经历 10 次冻融循环作用后土工袋处理层以下土体中发生了毛细水和薄膜水迁移; 引起了土体含水率增大, 而土工袋处理层没发生水分迁移。常规渠道边坡表面下 0, 10, 20, 30, 39 cm 处的含水率分别为 22.8%, 26.1%, 28.2%, 30%, 32%。10 次冻融循环作用后常规渠道与冻融循环试验前土体含水率相比含水率增大, 其原因为常规渠道土体中发生了毛细水和薄膜水的迁移, 常规渠道不同深度含水率大于相应深度土工袋处理渠道的含水率, 从而说明冻结时土工袋处理渠道的冻胀量小于常规渠道的冻胀量。衬砌渠道的冻胀随温度而变化。温度降低首先在衬砌板和土层接触面间的孔隙中产生冰晶体, 在毛细力作用下, 土体中的水分向冰晶体迁移, 使冰晶体

越来越大。随着温度继续降低, 在渠基土孔隙中也产生了冰晶体, 同样在毛细力作用下, 更深部位土体中的水分向上部迁移, 上部土体中冰晶体逐渐增大, 使土体冻胀更大, 并形成冻土层, 导致土体体积膨胀表面隆起。随气温的再降低, 冻土层的深度逐渐加大, 因冰冻而产生的冻胀力顶裂或顶起衬砌板而发生渠道冻胀破坏。通过不同冻融循环作用下土工袋处理渠道和常规渠道的含水率变化可知, 开放系统中土工袋处理渠道的土工袋处理层能抑制毛细水和薄膜水通过土工袋之间的上升作用, 故北方寒冷地区对渠道边坡冻深 1.5 m 用土工袋处理后可有效防渠道冻胀。

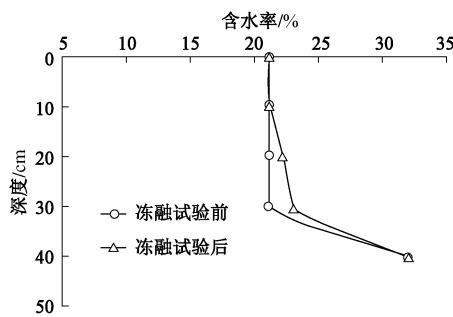


图 19 开放系统中土工袋处理渠道冻融前后含水率变化

Fig. 19 Variation of moisture content of soilbag-reinforced channel in an open system before and after freeze-thaw tests

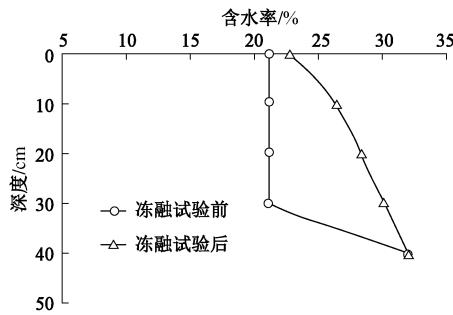


图 20 开放系统中常规渠道冻融前后含水率变化

Fig. 20 Variation of moisture content of traditional channel in an open system before and after freeze-thaw tests

### (3) 渠道温度变化

土体冻结过程中温度变化大致分为 3 个阶段: ① 土中水过冷阶段, 土中水处于负温但无冰晶存在; ② 温度跳跃阶段, 土中水形成冰晶晶芽和冰晶生长时释放结晶潜热, 使得土体温度骤然升高; ③ 持续冻结降温阶段, 随着土体中水部分相变成冰, 水膜厚度减薄、土颗粒对水分子的束缚能增大及水溶液中离子浓度增高, 冻结温度持续降低。图 21, 22 分别为 1 次冻融循环作用下 48 h 开放系统中土工袋处理渠道和常规渠道温度随时间的变化情况。由图可知, 土工袋处理渠道 5, 15, 25, 35 cm 温度分别为  $-7.3^{\circ}\text{C}$ ,  $-4.9^{\circ}\text{C}$ ,  $-3.3^{\circ}\text{C}$ ,

$-2.1^{\circ}\text{C}$ , 常规渠道 5, 15, 25, 35 cm 温度分别为  $-9.3^{\circ}\text{C}$ ,  $-7.6^{\circ}\text{C}$ ,  $-5.6^{\circ}\text{C}$ ,  $-4.0^{\circ}\text{C}$ , 冻结 48 h 时土工袋处理渠道不同深度温度的高于常规渠道不同深度的温度, 土体冻结过程中由于温度梯度作用, 使得热量由高温处向低温处传递, 在热传导过程中, 土工袋处理渠道的土工袋处理层处于蓄热状态, 导致土工袋处理渠道模型不同深度的温度变化滞后于土体的温度。

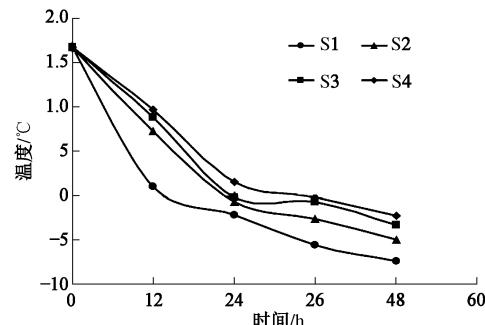


图 21 开放系统中土工袋处理渠道温度变化

Fig. 21 Variation of temperature of soilbag-reinforced channel in an open system with time

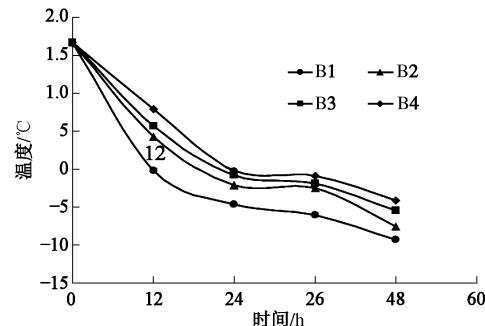


图 22 开放系统中常规渠道温度变化

Fig. 22 Variation of temperature of traditional channel in an open system with time

### (4) 渠道融沉量变化

融沉量也是渠道防冻胀中的重要控制指标, 工程中土体的融沉量过大, 会导致渠道衬砌体和衬砌体以下的土体脱离或者衬砌体与土体整体下沉, 渠道行水期间在水流冲刷和水压力作用导致渠道衬砌体坍塌或上抬, 从而造成衬砌渠道的破坏。

图 23, 24 分别为 1 次冻融循环作用下 48 h 开放系统中土工袋处理渠道和常规渠道的冻胀变化情况。从图可知, 48 h 土工袋处理渠道 S6 测点处最大融沉量为 0.87 cm, 常规渠道 B6 测点处最大融沉量为 1.92 cm。

图 25, 26 分别为 10 次冻融循环作用下 48 h 开放系统中土工袋处理渠道和常规渠道的融沉量变化。48 h 土工袋处理渠道 S6 测点处和常规渠道 B6 测点处最大融沉量分别为 1.21, 2.38 cm; 与 1 次冻融作用下土工袋处理渠道和常规渠道的冻胀量相比, 10 次冻融循

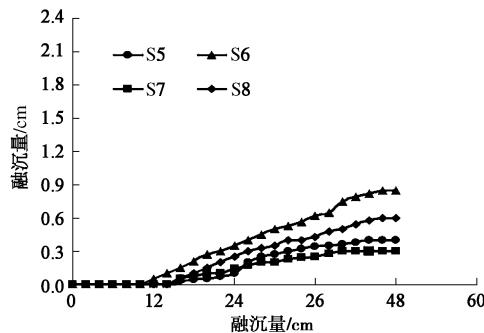


图 23 土工袋处理渠道融沉量变化 (1 次)

Fig. 23 Variation of thawing settlement of soilbag-reinforced channel in an open system with time (1 freeze-thaw cycle)

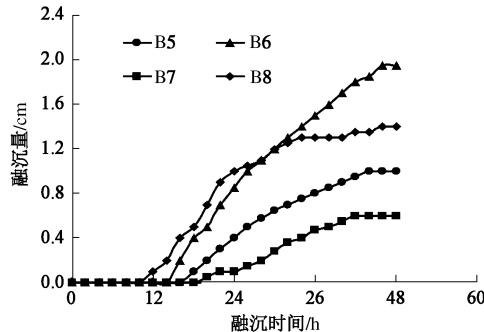


图 24 常规渠道融沉量变化 (1 次)

Fig. 24 Variation of thawing settlement of soilbag-reinforced channel in an open system with time (1 freeze-thaw cycle)

环作用后土工袋处理渠道和常规渠道的冻胀量小于其融沉量, 冻融循环作用后最终呈现为固结。土工袋处理渠道的融沉量变化主要是由土工袋处理层以下土体固结引起, 通过冻融循环作用下开放系统中土工袋处理层的含水率变化可知, 冻融循环作用后土工袋处理层的含水率没发生变化, 开放系统和封闭系统中土工袋处理层冻胀量相当。因此, 土工袋处理渠道具有防冻胀效果。通过室内模型试验已验证土工袋具有抑制袋内土体冻胀效果、抑制毛细水和薄膜水上升的作用, 北方寒冷地区渠道冻深一般为 1.0 m 左右, 因此, 将填方渠道、挖方渠道、半挖半填渠道表层 1.0 m 范围的土体用土工袋处理, 具有较好的防冻胀效果。

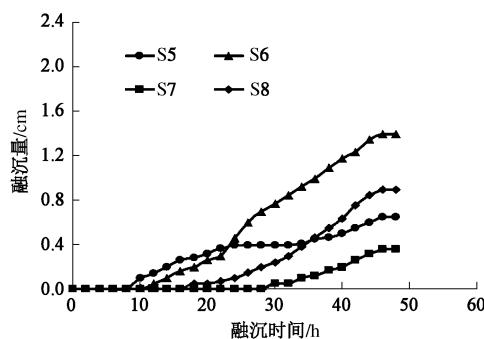


图 25 土工袋处理渠道融沉量变化 (10 次)

Fig. 25 Variation of thawing settlement of soilbag-reinforced channel in an open system with time (10 freeze-thaw cycles)

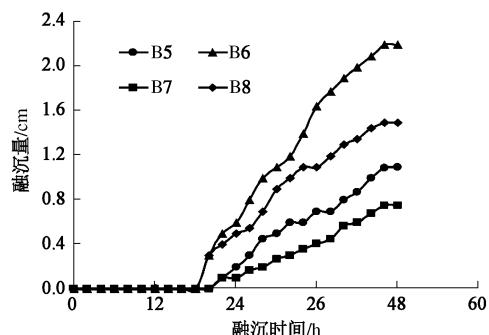


图 26 开放系统中常规渠道融沉量与时间关系 (10 次)

Fig. 26 Variation of thawing settlement of soilbag-reinforced channel in an open system with time (10 freeze-thaw cycles)

### 3 结 论

通过研究冻融循环作用下土工袋处理渠道和常规渠道冻融冻胀特性, 得到以下 6 点结论。

(1) 本文通过室内对比试验揭示了土工袋防渠道冻胀机理, 验证了土工袋防渠道冻胀效果, 提出了土工袋防渠道冻胀的新方法。

(2) 通过开放系统与封闭系统中土工袋处理渠道和常规渠道冻融模型试验, 得到了土工袋具有防渠道冻胀效果; 土工袋具有加筋、抑制毛细水和薄膜水通过土工袋之间上升的作用, 土工袋防渠道冻胀是一种新方法。

(3) 在封闭系统中, 土工袋处理渠道通过加筋作用达到防冻胀效果。土工袋处理渠道冻胀量和融沉量均小于常规渠道冻胀量和融沉量; 10 次冻融循环作用后土工袋处理渠道的冻胀量和融沉量基本相等, 而常规渠道的融沉量大于冻胀量。

(4) 在开放系统中, 土工袋处理渠道通过抑制毛细水和薄膜水通过土工袋之间上升, 达到防冻胀效果。10 次冻融循环作用后土工袋处理渠道的冻胀量小于常规渠道的冻胀量; 冻融循环作用对土工袋处理渠道的冻胀量有影响, 10 次冻融循环作用后的冻胀量大于 1 次冻融循环作用的冻胀量。

(5) 通过开放系统中土工袋处理渠道和常规渠道融沉试验, 10 次冻融循环作用后土工袋处理渠道的融沉量小于常规渠道的融沉量, 由于较大的融沉量会造成渠道衬砌体与渠道基土脱离, 导致渠道行水期间衬砌体的坍塌, 因此, 渠道及其建筑物防冻胀应该同时考虑冻胀量和融沉量的作用。

(6) 封闭系统与开放系统中土工袋处理渠道和常规渠道的含水率的变化规律不同。经历 10 次冻融循环作用后, 土工袋处理层的含水率在封闭系统与开放系统中基本不变, 土工袋处理层以下土体及常规渠道土体的含水率在开放系统中与试验前相比有所增大, 表

明土工袋处理层能抑制毛细水和薄膜水通过土工袋之间的上升。

## 参考文献:

[1] 陈肖柏, 刘建坤, 刘鸿绪, 等. 土的冻结作用与地基[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (CHEN Xiao-bai, LIU Jian-kun, LIU Hong-xu, et al. Frost action of soil and foundation engineering[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))

[2] MATSUOKA H, LIU S H. New earth reinforcement method by soilbags[J]. Soils and Foundations, 2003, **43**(6): 173 – 188.

[3] MATSUOKA H, LIU S H. A new earth reinforcement method using soilbags[M]. Rotterdam: A A Balkema Publishers-Taylor & Francis, 2005.

[4] 刘斯宏, MATSUOKA H. 土工袋加固地基新技术[J]. 岩土力学, 2007, **28**(8): 1665 – 1670. (LIU Si-hong, MATSUOKA H. A new earth reinforcement method by soilbags[J]. Rock and soil mechanics, 2007, **28**(8): 1665 – 1670. (in Chinese))

[5] MATSUOKA H, LIU S H, UEDA T, et al. Model tests on improvement method for the bearing capacity of crushed stone foundation under railway sleepers by soilbags[C]// Proceedings of the 33th Japan National Conference on Geotechnical Engineering. Osaka, 1998: 2377 – 2378.

[6] MATSUOKA H, LIU, S H, KODAMA H, et al. Reduction of settlement for ballast foundation under railway sleepers by soilbags[C]// Proceedings of the 35th Japan National Conference on Geotechnical Engineering. Tokyo, 2000: 1081 – 1082.

[7] MATSUOKA H, MAURAMATSU D, LIU S H, et al. Reduction of environment ground vibration by soilbags[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2004, (764III-67): 235 – 245.

[8] MATSUOKA H, LIU S H. A new earth reinforcement method using soilbags[M]. Rotterdam: A A Balkema Publishers-Taylor & Francis, 2006.

[9] 刘斯宏, 汪易森, 朱克生, 等. 有荷条件下南阳膨胀土强度试验及其应用[J]. 水力学报, 2010, **41**(3): 361 – 367. (LIU Si-hong, WANG Yi-sen, ZHU Ke-sheng, et al. Experimental study on strength characteristics of Nanyang expansive soil under loading and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, **41**(3): 361 – 367. (in Chinese))

[10] 白福青, 刘斯宏, 王艳巧. 土工袋加筋原理及极限强度的分析研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(增刊 1): 172 – 176. (BAI Fu-qing, LIU Si-hong, WANG Yan-qiao. Research on reinforcement mechanism and failure strength of soilbags[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(S1): 172 – 176. (in Chinese))

[11] 刘斯宏, 王柳江, 李 卓, 等. 土工袋加固软土地基现场荷载试验的数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2012, **32**(1): 78 – 82. (LIU Si-hong, WANG Liu-jiang, LI Zhuo, et al. Numerical simulation of in-situ loading tests on a soilbag reinforced soft foundation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, **32**(1): 78 – 82. (in Chinese))

[12] 李 卓, 刘斯宏, 王柳江, 等. 冻融循环作用下土工袋冻胀量和融沉量试验[J]. 岩土力学, 2013, **34**(9): 2541 – 2545. (LI Zhuo, LIU Si-hong, WANG Liu-jiang, et al. Experimental study of frost heave and thawing settlement of soilbags under different freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(9): 2541 – 2545. (in Chinese))

[13] MILLER R D. Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils[J]. Highway Research Record, 1972, **393**: 1 – 11.