

DOI: 10.11779/CJGE201810006

# 寒区输水渠道衬砌与冻土相互作用的冻胀破坏试验研究

王 翊<sup>1, 2</sup>, 王正中<sup>\*1, 2</sup>, 刘铨鸿<sup>1, 2</sup>, 肖 昊<sup>1, 2</sup>

(1. 西北农林科技大学旱区寒区水工程安全研究中心, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 寒区输水渠道冻胀破坏直接影响着工程安全及效益发挥, 基土冻胀变形及其与结构相互作用共同导致衬砌冻胀破坏发生。采用低温室循环供冷, 模型槽底部砂砾石层补水, 设计衬砌渠道低温冻胀模型试验, 研究渠基土体的温度场、水分场、变形场和衬砌位移之间动态耦合规律, 对比观测了冻融试验前后渠基土横剖面物理性状的变化。研究表明: 引起基土冻胀变形的水分迁移量及结冰量受温度梯度、冻结速率控制, 也受土体初始含水率的制约; 渠道断面形状影响渠道的温度边界和热传导, 使各部位冻结速率及冻胀变形不一致。渠基土冻结过程中兼有冻胀和挤压, 土体受挤压程度同样受渠道衬砌及断面形状的影响, 土体内应力复杂。渠基土冻胀与衬砌位移不协调, 导致渠底衬砌与土体脱空且偏心受拉。土体冻结时与衬砌间形成接触分凝冰层, 传递作用力; 温升融化时, 接触分凝冰层消融, 表层土体强度丧失, 造成渠坡滑动失稳破坏和衬砌结构大面积的滑塌。

**关键词:** 衬砌渠道; 冻胀破坏; 模型试验; 水热力耦合; 接触分凝冰层

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)10-1799-10

作者简介: 王 翊(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事旱区寒区水工程安全研究。E-mail: wangyimutou@126.com

## Experimental investigations on frost damage of canals caused by interaction between frozen soils and linings in cold regions

WANG Yi<sup>1, 2</sup>, WANG Zheng-zhong<sup>1, 2</sup>, LIU Quan-hong<sup>1, 2</sup>, XIAO Min<sup>1, 2</sup>

(1. Institute of Water Resources and Hydropower Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Water Engineering Safety Research in Arid and Cold Region, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** In cold regions, the safety and efficiency of water conveyance canals are threatened by freeze-thaw damage. This damage is caused together by the heave and settlement deformation of soils and the interaction between soils and lining structures during the deformation. The model tests on freeze-thaw of a lining canal are conducted using the method of circulation cold supply in low temperature chamber and water supply from sand gravel in model tank base. Through the tests, the dynamic coupling laws of soil temperature fields, moisture fields, deformation fields and lining displacements are studied, and the change of physical properties in different canal cross sections is observed. The results show that the migrating and freezing of moisture causing soil deformation is controlled by temperature gradient and freezing rate, and restricted by soil initial water content. The cross-section of the canal affects its temperature boundary and heat transfer process, leading to the difference of freezing rate and frost-heave distribution. The frost heave and compression occur inside the freezing soils at the same time, and the compression of soils is affected by the cross-section of the canal, which causes intricate internal stress of canal soils. The freezing heave of soils and displacement of linings are not coordinated, which forms the gap between them and causes eccentric tension in the linings. In addition, the touch segregated ice layer is formed and transmits the interaction between soils and linings during freezing, and during thawing, the ice layer melts and the strength of surface soils loses, which causes the canal slope to slide to induce instability and slump of lining structures in a large scale.

**Key words:** lining canal; freeze-thaw damage; model test; moisture-thermal-stress coupling effect; touch segregate ice layer

## 0 引言

随着西部大开发“十三五”规划的实施, 一批重大水利、交通工程将在中国西部寒区投入建设。寒区渠道作为线状输水工程, 与管道、隧洞相比, 具有造价低、施工简单、输送流量大、易维护等优点, 是重

基金项目: 国家重点研发计划“水资源高效开发利用”重点专项(2017YFC0405101); 国家自然科学基金项目(51279168); 十二五科技支撑计划(2012BAD10B02); 冻土工程国家重点实验室基金项目(SKLFSE-201105); 教育部博士点基金项目(20120204110024)

收稿日期: 2017-07-07

\*通讯作者(E-mail: wangzz1910@163.com)

大引调水工程中重要的输水选择。为了保护渠坡、减少沿程水头损失、防止渗漏和冲刷并提高渠道输水效率和速度，混凝土或浆砌石衬砌渠道应用非常普遍。然而，寒区的衬砌渠道常常会发生冻胀破坏现象，与其他建筑物的冻胀破坏相比，具有以下特殊性：

(1) 结构单薄、刚度不大不小、对土层冻胀变形既不能完全约束又不能很好适应，加之衬砌体的抗折与抗拉强度低，所以基础变形时，较小的结构应力便可能造成衬砌破坏<sup>[1-3]</sup>。

(2) 即使采用了衬砌及其他防渗措施，渠道输水过程中难以避免地会发生渗漏，增大了渠道附近土层含水率，土体冻结后含冰量和冻胀量较其他建筑物大<sup>[4]</sup>。

(3) 渠槽常为梯形、U型或弧底梯形等形状，冻结期呈现双向冻结特点，使得热传导与水分迁移的途径具有二维特征，冻胀量在渠道断面上的分布极不均匀，对衬砌结构的破坏性更大。

(4) 输水渠道衬砌一旦破坏产生裂缝甚至脱落，将造成大量水资源的渗漏损失，渗入土层中的水分滞留并冻结后又加剧冻胀，造成渠道结构冻胀破坏的恶性循环，渠道衬砌冻胀破坏不仅包括了强度破坏，而且还包括了失稳滑塌。由此可见，渠道衬砌的冻胀破坏较其他水工建筑物形式更加复杂，程度更加剧烈，所以为防止寒区渠道衬砌冻胀破坏，需要对渠基土的冻胀特点以及衬砌结构冻胀破坏原因进行深入的研究。

渠基土冻结与冻胀机理，国内外进行了系统研究。其过程为，冬季气温持续低于 0℃ 时，地表土层开始冻结，冻结锋面向深部发展，同时伴随着冻结土层中自由水的原位冻结和未冻土层中自由水在温度梯度与基质势作用下向冻结锋面迁移并冻结成冰的复杂过程，导致了冻结锋面附近冰晶体积聚从而撑开土体孔隙，形成了土体的冻胀现象<sup>[5-6]</sup>。土体冻胀过程中，温度是诱发因素，造成土中水分冻结从而降低自由势能，导致水分向低温区域迁移；土中原位水分和迁移水分的冻结释放的潜热又会改变局部温度，阻止冻结锋面的继续推进；冻结水分体积膨胀，受土体约束而使分凝冰内应力增高，降低水分结冰点温度，使分凝冰融化并向压力较小区域迁移从新凝结。最终土体冻胀变形是温度、水分、应力 3 个物理场动态耦合达到平衡的结果<sup>[7-10]</sup>。

寒区建筑物冻胀破坏，是因为在冻胀土体上修建公路、铁路、房屋基础和渠道等建筑物时，较大刚度的结构约束土体冻胀变形，而不均匀的冻胀变形使结构产生了额外作用力而发生相应破坏；另一方面，当冻结土层中冰融化后，冻胀变形消失，土体强度显著

降低，土体产生融沉，此时上部建筑物难以完全同步恢复，从而造成建筑物与土层之间的空隙，削弱了地基基础的承载力和稳定性，导致建筑物破坏。总之，冻胀与融沉土体的存在对建筑物安全造成威胁，缩短了结构的寿命，造成巨大的经济损失<sup>[11]</sup>。

具体到寒区渠道，其衬砌结构的破坏也是冻土与结构相互作用的结果，早期学者分析衬砌破坏时将其处理为冻土对衬砌结构的法向与切向的冻胀力，其值与冻土冻结温度、含水率和衬砌材料结构相关，通常由试验测定。这样可以将复杂的冻土-衬砌相互作用模型简化为两种荷载作用下的衬砌结构的力学分析模型<sup>[1-2, 12-14]</sup>。这种分析适用于工程设计，但是冻土与衬砌间作用较为复杂，且在衬砌变形过程中这种作用力也是动态变化的。基于此，随后的研究将冻土与衬砌看做两层刚度不同的材料组成的复合结构，令衬砌与冻土协调变形从而可以分析衬砌结构受力特征，并采用有限元方法对衬砌变形与应力进行计算；与结构力学模型相比，这种分析手段可以考虑到冻土与结构变形过程中相互作用力时间与空间的变化<sup>[15-17]</sup>。实际上，冻土与衬砌结构不总是紧密接触，将两者处理为复合材料的模型无法解释冻融循环过程中衬砌结构的滑塌现象。针对这一问题，李爽等<sup>[18]</sup>和孙厚超等<sup>[19-20]</sup>认为冻土与衬砌间存在接触层，该接触层冻结时提供了有条件的约束作用，而在温度升高基土融化时约束解除，土体与结构容易脱开，通过设计试验装置对接触层的力学性质进行了研究。但是接触层存在形式还不清楚，其随外界温度、水分条件而演变的规律更加模糊，因此还无法揭示衬砌渠道滑塌破坏的规律。

为研究寒区渠道在冬季低温条件下，渠槽断面二维空间内土体温度场、水分场及冻胀变形之间的复杂耦合特征，以及由此引起的冻土与衬砌结构相互作用规律，本文设计了深埋地下水饱和渠基土衬砌渠道的冻胀模型试验，对冻土与衬砌结构间的接触层进行观测并分析其产生的原因。

## 1 试验模型设计与设备

### 1.1 模型设计

设计了深埋地下水位饱和土渠道冻胀破坏模型试验，横断面渠槽深 40 cm，坡比 1:1.5，渠底宽 40 cm，渠顶基土厚 100 cm，渠底基土厚 60 cm，纵向总长度 200 cm。模型修建于 200 cm×200 cm×100 cm 的模型箱中。采用具有近似强度、密度且导热系数相差不大的瓷砖代替混凝土衬砌，依然以水泥砂浆作为垫层，砂浆层与瓷砖总厚度为 2 cm。在渠道纵向定为 z 轴，竖向为 y 轴向下为正，水平向为 x 轴（图 1（a））。用

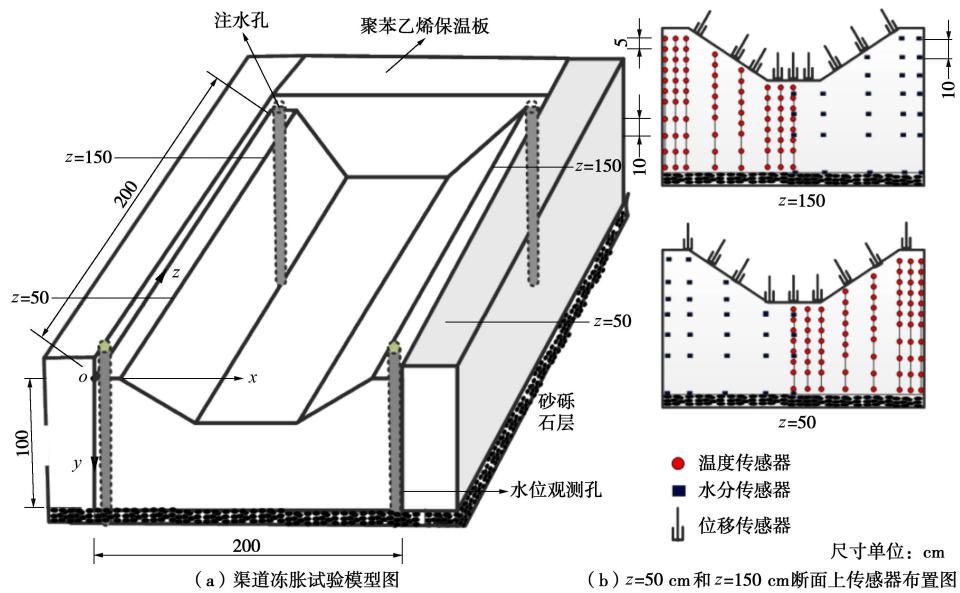


图1 试验模型图和断面上传感器布置图

Fig. 1 Model of canal and location of sensors

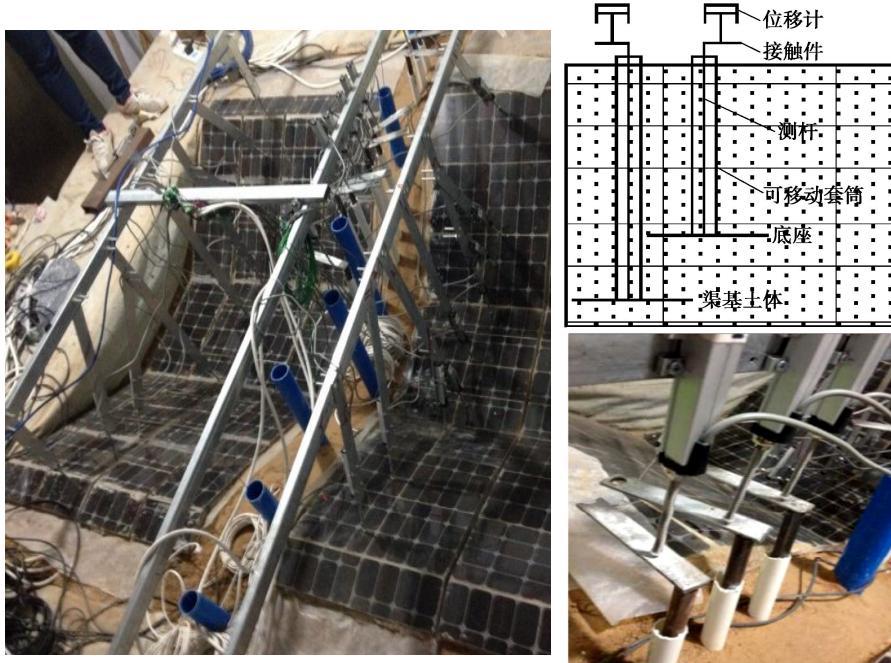


图2 渠道模型及分层冻胀计细节图

Fig. 2 Physical map of canal model and layered frost-heave bar

50 cm 厚聚苯乙烯泡沫板紧贴模型箱四周，并在缝隙处填充玻璃棉作为模型的绝热边界，在模型底部铺设 5 cm 砂砾石，上覆纱布用以模拟渠基底部的透水边界。为了模拟不同深度的地下水位，在模型四角埋设四根长度 1.2 m，直径 50 mm 的 PVC 管，管底插入砂砾石层内部，在管身下部 50 cm 长度内按梅花状分布钻孔，并用纱布包裹管身与管底以阻止土颗粒进入管中。在渠道纵向  $z=50\text{ cm}$  和  $150\text{ cm}$  位置处的横断面上分层埋设了温度和水分传感器，在衬砌表面架设了位移传感

器。温度传感器与水分传感器分别埋设在横断面两侧（图 1 (b)）。位移传感器垂直衬砌表面架设，以测量衬砌法向位移。在渠道纵向中间位置 ( $z=100\text{ cm}$  处) 不铺设衬砌，埋设分层冻胀测杆和监测水位的 PVC 管，管内放置压力式水位传感器（图 2）。

## 1.2 试验材料与设备

土样选用粉质黏土（即兰州黄土，比重 2.70，粉粒含量 58.6%，黏粒含量 34.3%，塑限 17.7%，液限 24.6%），夯筑模型前对土样进行筛选，去除杂质后堆

放在地面上，向土堆上均匀浇水直至土堆湿润，放置一天后继续浇水，如此存放 3 d，待水份充分均匀地分布于土堆后，制备得到质量含水率为 17%~22% 的土样。

试验设备由冷库、制冷系统、传感器和数采仪四部分组成。制冷系统包括压缩机，数控面板和风扇，通过强制对流方式对模型进行冻结。传感器包括热敏电阻式温度计（15 个一组，共 16 组），TDR 式水分计（60 个），电阻式位移计（28 个）和水位计（7 个）4 种类型。为测量土体分层冻胀位移，加工制作了冻胀测杆，其下端为  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 0.2\text{ cm}$  方形钢板，板上焊接直径 1 cm 细钢管，钢管上套直径 2 cm PVC 管，加工制作了冻胀杆上端的接触件，接触件加大位移计与冻胀杆间接触面积，防止滑动且可以绕冻胀杆 360° 旋转（图 2）。在模型上方架设了位移计支架体系，由模型两边支座和三根横梁组成，材料选用  $3\text{ cm} \times 6\text{ cm}$  方钢管以有效减小体系的挠度，保证测量精度。数采系统由 CR3000 型数采仪和 5 个扩展板组成。放置于塑料箱子中，箱中底铺有硅胶干燥剂，箱盖用聚氨酯发泡剂密封，这样可以有效防止数采系统受潮湿冷库潮湿空气影响。

### 1.3 试验初始条件设置

注水放置 336 h 后，水分传感器数值不再发生变化开始降温，试验环境温度初始设置为  $-20^\circ\text{C}$ ，20 h 后土体冻透，这时升温至  $-15^\circ\text{C}$  并保持 150 h 以便土体中形成较为稳定的温度场。随后停止降温后使土体在室温（平均温度  $17.2^\circ\text{C}$ ）下自然回温。

## 2 试验结果

### 2.1 渠道温度场

在试验过程中通过埋设于渠基土内的热敏电阻式温度传感器实时测量土体温度，由图 3 可以看出，降温初期，各深度土体的温度下降速率较快；50 h 左右，环境温度稳定，土层各深度降温速率趋于平稳；200 h 后环境温度由  $-20^\circ\text{C}$  升高至  $-15^\circ\text{C}$ ，土体温度先随之升高，而后随着环境温度稳定又开始下降并逐渐接近环境温度。本文选取左半边渠道断面内的初始温度场，50，200，350 h 温度场进行分析。

由整个试验过程中温度等值线图的变化可以看出，渠道上部的冻结速率高于下部，温度等值线开始平行于渠道边界的轮廓线，但随着试验进行，温度等值线开始变为水平（图 4）。

### 2.2 渠基土水分场变化

由图 5，试验开始前，传感器所测渠基土初始体积含水率为 39%~45%，在渠坡中央的土体内含水率最大，而靠近渠侧边界处含水率最小。

试验开始 30 h 后，渠堤与渠坡中上部土体水分等值线开始密集，未冻水含量数值迅速减小，说明此处土体内水分正在发生相变，成为冻结区。与此同时，在等值线密集区域下方，出现了水分等值线的峰值区域。垂直等值线作一条方向箭头，指向含水率高处，可以看出，此时水分聚集方向为渠堤和渠坡上部土体冻结区所在的位置。

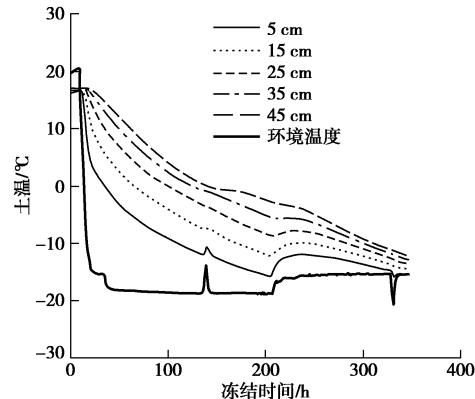
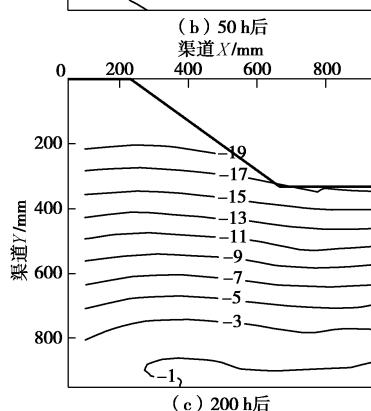
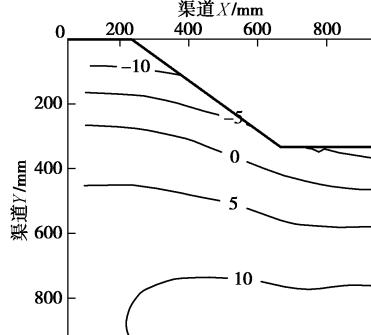
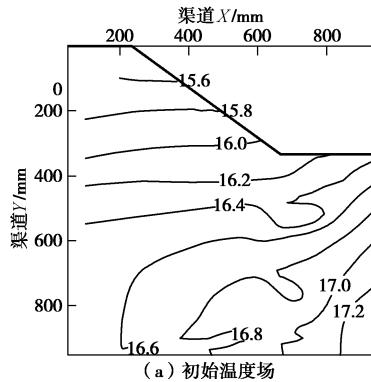


图 3 降温过程线及渠底土体各深度温度过程线

Fig. 3 Process of freezing and temperature of soil



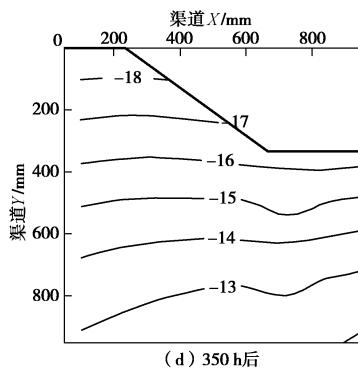


图 4 试验过程中渠基土内温度分布  
Fig. 4 Temperature fields in canal soils

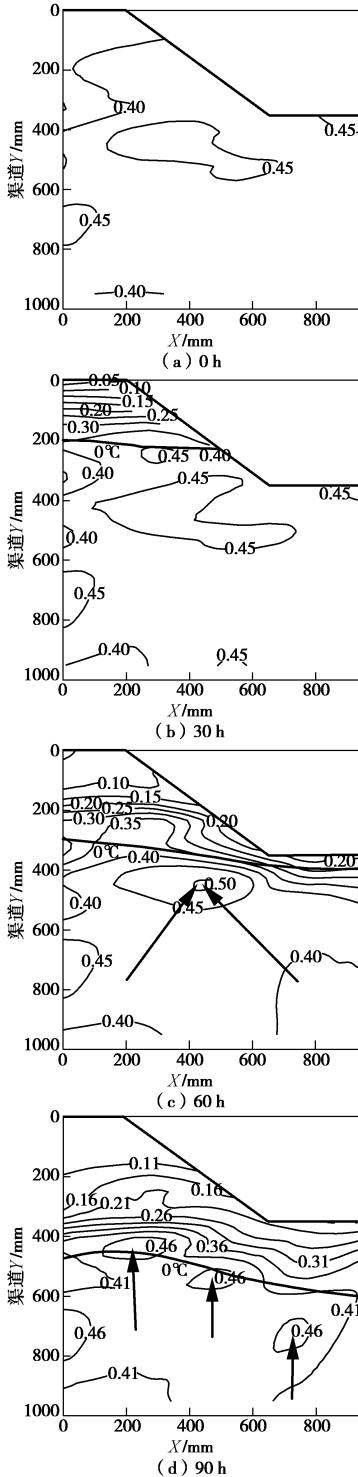


图 5 试验过程中渠基土含水率等值线图及  $0^{\circ}\text{C}$  等温线, 其中  $x$ ,  
 $y$  坐标定义同图 1

Fig. 5 Contours of water content and freezing isotherm (definition of coordinate is same as that in Fig. 1)

随试验继续进行，冻结区开始向渠坡下部和渠底发展，60 h 后，渠坡和渠底处土体开始冻结，并且在冻结区下方分别出现了水分聚集的区域。90 h 后，渠堤的冻结区下移至与渠底相同高度处，同时渠底下方土体的冻结区的范围有所扩大，此后的 60 h 内，渠堤和渠坡处冻结区的位置下移缓慢，范围逐渐缩小，且其下方水分聚集区内的含水率也随之减小；而渠底处冻结区开始向下发展，冻结区范围和其下方水分聚集区内的含水率几乎保持不变。

此外，可以看出，随着试验进行，在冻结缘下方的含水率等值线逐渐由水平变为竖直，说明未冻水的迁移形式由开始的竖直迁移变为兼有竖直迁移与水平迁移。

## 2.3 渠道冻胀位移

由于弹性模量、冻胀产生原因的差异（土体冻胀由冰体积膨胀和分凝冰积聚产生，衬砌冻胀因土体位移而被动产生），衬砌与土体的冻胀变形并不完全一致。为此，试验中分别对土体分层冻胀量和衬砌表面总体冻胀量进行了测量。

### (1) 渠基土体的冻胀变形

为测量土体自身冻胀量，在模型中部留有未衬砌渠道断面，并在该断面的渠堤、渠坡中部、渠坡脚和渠底中部的位置埋设了4组分层冻胀计。以土表层为

原点且竖直向上为正方向,冻胀计底座放置位置分别为 $-5$ , $-15$ , $-25$  cm,在试验中所测量的位移值代表该位置以下土体的位移,相邻两个位置测量位移值差值表示两个位置之间土体的变形。

由四组分层冻胀计测量结果可以看出(图6),渠基土冻结时逐层产生冻胀位移,而未发生冻胀的土层则会产生一定的压缩沉降。在所有冻胀土层中, $-15$  cm~ $-25$  cm之间 $10$  cm厚的土层所产生的冻胀量最大,占总冻胀量的 $50\% \sim 70\%$ 。

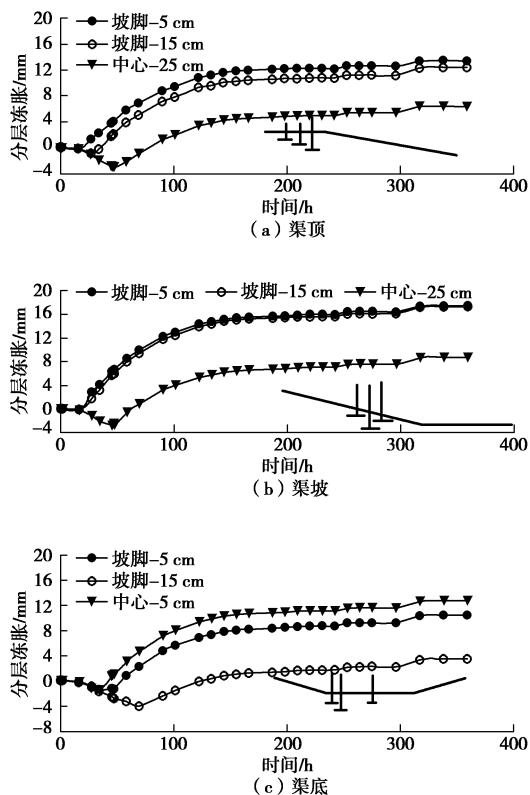


图6 渠基土体分层冻胀量随时间变化曲线

Fig. 6 Process of layered frost heave of soils

对比渠顶、渠坡、坡脚和渠底的分层冻胀量,可以看出,渠坡总冻胀量最大( $17.4$  mm),其次是渠顶( $13.4$  mm),而渠底最小且渠底坡脚( $10.4$  mm)小于渠底中心( $12.6$  mm);此外,冻结土体冻胀变形时,下层未冻土体有不同程度的沉降变形,其中渠底最大, $-15$  cm处达到了 $3.9$  mm( $-25$  cm处没有测量),其次是渠顶,深层土体压缩量最小位置在渠坡, $-15$  cm处只有 $0.16$  mm可以忽略。

## (2) 衬砌结构法向位移

渠道衬砌结构因土体冻胀变形而发生法向和切向位移,本试验在渠道 $z$ 方向( $z$ 方向定义见图1)相距 $100$  cm的两个平行断面上各布置了9个位移传感器,对衬砌法向位移进行了测量并取两个断面相同 $x$ 坐标上位移值平均值作为最终衬砌法向位移值。选取最上层分层冻胀计所测的土体竖直位移,经过几何变换转

化为垂直于坡面的土体法向位移。经过以上处理,得到了衬砌与土体法向冻胀位移在渠道断面上的分布(图7(a)、(b))。

在图7(a)中,衬砌开始产生冻胀位移时,渠坡中部法向冻胀量最大,随后渠底冻胀量逐渐增大直到与渠坡中部相等甚至超过。试验结束后( $350$  h后),温度升高,渠坡中上部连同渠顶率先开始沉降。

在图7(b)中,土体开始产生冻胀位移时,同样是渠坡中部法向冻胀量最大,而渠底有一定程度的沉降量,随着试验进行,渠顶、渠坡和渠底冻胀量增加,但是依然保持渠坡中部最大,坡脚最小,而其他位置冻胀量相差不大,融化期渠坡中部与渠顶率先沉降。对比两图可以看出对渠道进行衬砌后冻胀量分布较为均匀,且渠坡中下部和渠底冻胀量较大;而未衬砌渠道渠基土冻胀分布极为不均匀且最大冻胀位置在渠坡中部附近;在融化期,衬砌与未衬砌渠道都在渠坡与渠顶位置率先发生沉降。

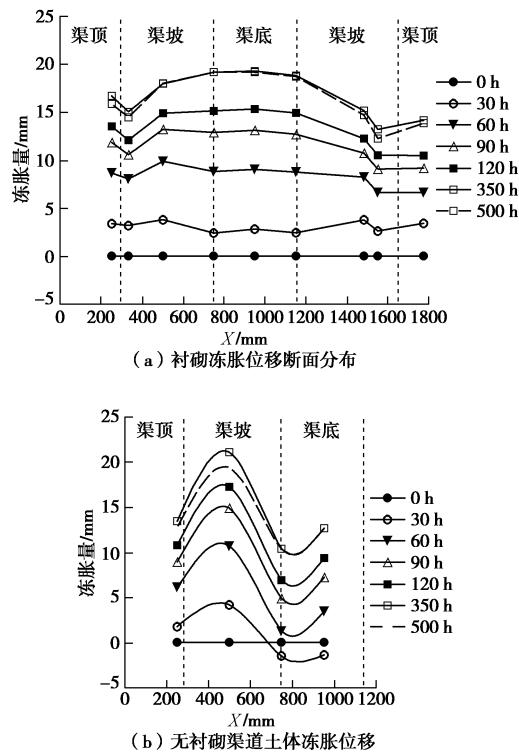


图7 衬砌冻胀位移与土体总冻胀位移断面分布图

Fig. 7 Distribution of linings and displacement of soils caused by frost heave

## 3 衬砌渠道冻胀破坏机理讨论

### 3.1 温度场和水分场耦合作用对渠道冻胀的影响

试验中通过鼓风机对模型周围环境进行强制对流降温,更加接近自然界降温过程,所以渠基土温度场变化特点与恒定温度边界降温条件下的温度场有很大不同,主要表现为土体冻结锋面推进速度(下称冻结

速率)从渠顶至渠底递减。原因是渠顶较为平坦和开阔, 空气流速大, 加之渠顶为双向冻结, 从而对流换热效率最高, 加速了渠顶土体的冻结。而对于渠底来说, 情况正好相反, 冷空气经过渠顶和渠坡的阻挡流速降低且温度升高, 且渠坡土体对渠底土体产生了侧向的保温作用, 所以冻结速率最低。

大量的有关单向冻结试验的结果表明, 土体在冻结锋面与已冻土之间的正冻土区域内发生冻胀, 而远离冻结锋面的已冻土冻胀量可以忽略不计。所以冻胀发生于一定温度范围内(视土质而定), 且在开放系统中土的冻结速率与冻胀量成反比<sup>[21-22]</sup>。在本试验中, 土体最大冻胀量出现在渠坡中部, 而此处的冻结速率并不是最小, 至于冻结速率最大与最小的渠底和渠顶冻胀量都较小(图8)。结合渠基土水分场变化分析这一现象的机理是冻结速率最高的渠顶土体内首先出现分凝冰带并随冻结锋面的快速推进而向下发展, 但由于冻结锋面推进较快, 分凝冰生长不充分, 冻胀量不是最大。而渠坡分凝冰出现略晚于渠顶, 但是冻结锋面推进速度比渠顶慢, 分凝冰可以充分发展, 由图5可以看出从60 h以后渠坡下部长期存在着分凝冰层, 所有冻胀量最大; 而渠底虽然冻结速率最小, 本应该分凝冰发展更加充分, 但因冻结时间较短加之前期水分大部分迁移至渠坡处而无法形成足够分凝冰, 不足以在渠底产生更大的冻胀量。

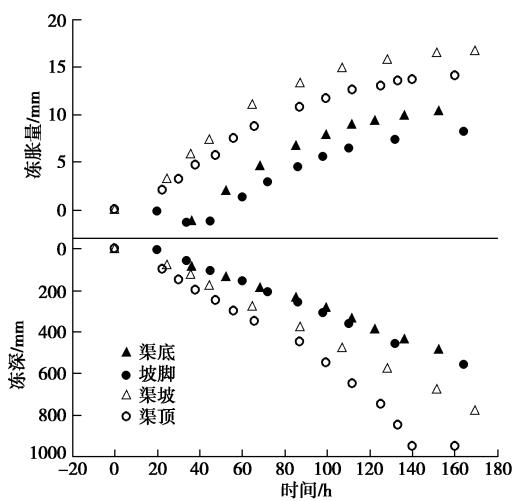


图8 渠基土不同部位冻胀量曲线与冻深曲线, 冻深曲线斜率表示土体冻结速率

Fig. 8 Process of frost heave and freeze depth along section of canal soil (slope on freeze depth is rate of soil freezing)

综上, 渠道断面形状、风速场以及土壤水分的制约作用造成了冻结过程中温度场和水分场重分布的规律与一维单向冻结迥然不同, 梯形渠道由渠顶、渠坡到渠底由双向冻结转变为单向冻结, 冻结速率由大变小; 冻胀量呈渠坡最大, 渠顶、渠底较小的分布特点。

二维空间内的冻土温度场、水分场及位移场三者的耦合作用机理更为复杂。

### 3.2 渠基土分层冻胀-挤压变形与渠坡失稳分析

由试验结果, 基土冻胀量分层产生且下层土体冻胀时上层已冻胀部分基本不会继续产生冻胀, 这与徐学祖等<sup>[23]</sup>和陈继等<sup>[24]</sup>等得出的规律一致, 这是因为水分从未冻土向冻结锋面迁移并主要在冻结缘上方分凝成冰, 而在上方的已冻土区域的水分迁移和次生冻胀非常微小, 不足以产生明显冻胀。

在产生冻胀的土层以下未冻土区域会因受到冻胀土体挤压而发生沉降变形, 但是沉降变形程度与土体侧向的约束形式有关。由于渠顶和渠坡土体先发生冻胀, 对渠底和坡脚土体产生挤压, 所以渠底尤其是坡脚表层土体在冻胀前会产生较明显的沉降变形, 而且随着深度增加, 土体受到挤压更甚从而沉降量也越大。在渠顶位置土体受到模型箱边壁约束和渠坡冻胀的挤压, 但是由于渠坡冻胀产生晚于渠顶, 且斜坡对渠顶挤压有限, 所以渠顶土体表层几乎没有沉降, 而是在-15 cm处有较为明显沉降(图6 渠坡分层冻胀量图)。渠坡只在一侧受到渠顶土体约束, 另一侧为临空面, 土体受挤压作用最小, 所以没有明显沉降。土体受挤压作用的程度对最终冻胀量也产生了影响, 是导致渠坡冻胀量偏高, 渠底偏低的另一个原因。

渠基土体分层挤压与冻胀交替发生并随着冻结封面向前推进, 造成了土体结构破坏和内部复杂的应力分布。具体地, 在渠坡处表层土体有冻胀, 深层挤压较弱, 在渠底土体挤压作用明显, 在渠坡与渠底交界的坡脚, 土体受挤压最为严重。据此预测, 在反复冻融循环情况下, 寒区渠道渠坡处土体逐渐疏松, 可能成为水分富集区域造成冻结期冻胀量逐年增大而融化期土体失稳向下滑动, 而坡脚处容易产生土体剪切破坏和渠坡失稳。

综上, 由于渠道断面形状造成各部位基土的边界约束不同, 土体在表层及深部受挤压作用的强弱也不同, 不仅产生渠道各部位冻胀量分布的差异, 更严重的是在季节性冻融交替过程中土体结构发生变化从而容易发生失稳破坏。

### 3.3 衬砌与基土的位移不协调性

衬砌结构整体性强刚度大, 当渠坡土体产生较大冻胀量将上方衬砌板顶起后, 会对下方渠底处衬砌板产生向上的牵引力(图9), 而由上面的分析已知渠底冻结较慢, 在渠坡冻胀时, 渠底土体与衬砌冻结力还未完全发挥, 所以在冻胀开始渠底处的衬砌便会脱离土体并且随着冻胀发展衬砌与土体间隙将加大。在融化期, 温度较高的渠底土体应该首先恢复变形, 但是渠底衬砌板却没有首先复位而是从渠坡中上部和渠顶

开始,这一现象更加证明了渠底衬砌与土体间存在间隙的推测。在某些渠道衬砌冻胀规律研究的文献中,认为冻胀最大位置发生在渠底和渠坡下部<sup>[14, 25]</sup>,而一些仅仅研究渠基土冻胀规律研究的文献<sup>[26]</sup>却显示冻胀最大位置发生在渠坡处。用本文实验表明由于渠道断面形状的影响使渠道断面各点的地下水埋深及温度场不同,所以全断面冻胀大小差异较大且不同步,导致土体与衬砌变位不一致且存在间隙的结论可以合理解释产生以上两种矛盾结果的原因。

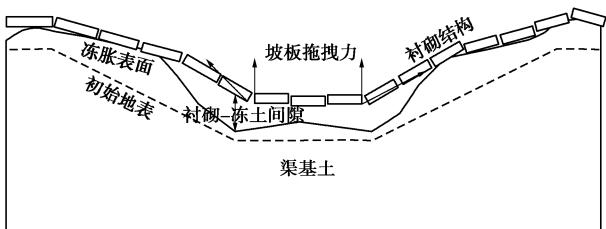


图 9 土体与衬砌冻胀变形关系示意图

Fig. 9 Deformations of canal soils and linings

渠底衬砌结构位移产生的机理不同,结构的受力状态也不同。如果渠底板是由于下方土体冻胀而被顶起,那么结构内部会产生从渠底至渠顶的压应力;而如果是由于渠坡衬砌牵引而引起的位移,悬空的衬砌在重力与坡板拖拽力共同作用下,成为偏心受拉构件。相比而言,后一种情况衬砌结构更容易破坏。

综上,渠道基土冻胀不同步,基土与衬砌位移不协调,导致衬砌与基土脱空以及衬砌拉裂等现象的发生。

### 3.4 土体与衬砌结构相互作用界面特性

降温结束后,为观察冻土与衬砌接触界面的本质,将渠道  $z=20\text{ cm}$  处断面上衬砌揭开进行观察。发现冻土与衬砌并非紧密结合,而是在两者间存在一层厚度不一的纯冰层,冰层完全将土颗粒排挤在下方。冰层厚度最薄处为  $1\text{ mm}$ ,位于渠坡与渠顶靠近渠坡位置,最厚  $3\text{ mm}$ ,分布在渠坡接缝处和渠底部分(图 10)。



(a) 渠顶冰层

(b) 渠坡及其接触处冰层

图 10 衬砌板与土体界面的纯冰层现象

Fig. 10 Segregated ice layer between soils and linings

已有文献[27~29]对土体中分凝冰形成机制做出了解释,认为在即使温度远低于冰点时,冰表面也存

在厚度在微米级别的薄膜水,薄膜水与冰颗粒保持热力学平衡状态且势能较低,在势能梯度作用下温度较高处的未冻水向冰表面迁移并凝结以保持热力学平衡。与此同时水膜内部的水压对侵入的土颗粒产生排斥作用使土颗粒远离冰表面,最终冰从土颗粒孔隙中分凝而出并且不断生长形成与土体分离的冰带。

在均质的土体中,冰分凝形成冰带并增厚是较为缓慢的过程,因为需要有足够的冰压力将土体撑开形成分凝冰存在的空间。但是土与衬砌在界面上并非完全紧密接触而是存在较大的间隙(相比土颗粒孔隙而言),当渠道表面温度降低时,衬砌结构温度降低很快,水分首先在衬砌下表面冻结,土壤中的水分在势能梯度作用下不断向衬砌板处迁移并且被阻隔在衬砌板与土体的间隙内。无法继续向上迁移的水分逐渐冻结并将附近土颗粒向四周排挤,最终形成分凝冰层界面。在冻结期,除土体冻胀变形外,界面冰层也是造成衬砌结构冻胀量的一个因素,而且冰层产生的冻结力限制了结构的相对位移;在温升初期,冰层表面自由水膜增多,此时衬砌结构置于光滑的冰水面上,导致滑动的危险;温升后期,分凝冰层完全消失,表层土体成为丧失强度的超饱和泥浆层,进一步加剧了渠坡衬砌的整体滑动失稳。

## 4 结 论

通过梯形渠道冻胀模型试验,进行了饱和封闭系统的冻结试验,试验选取代表剖面对土体温度场、水分场和位移场进行了监测,通过分析渠基冻土温度、水分和变形数据的变化规律和相互作用关系,以及冻土地基与渠道衬砌的变形差异,对寒区输水渠道冻胀破坏形成以下认识:

(1) 渠道断面的二维空间特征使土体冻胀过程中温度场、水分场和位移场的耦合作用更为复杂,渠基土温度、水分和冻胀量的分布与一维单向冻结迥然不同。具体地,渠道断面形状对空气流态造成影响,使得渠道不同部位热交换效率有差异,渠基土冻结速率不一致及冻胀不同步。冻结速率的差异影响了渠基土内各部位水分冻结先后顺序以及水平方向含水率分布差异,水平方向含水率的差异以及非饱和土体的基质势增大共同影响了未冻水迁移方向,导致最终含冰层在渠坡富集造成较大冻胀量。

(2) 渠道断面形状使各部位边界约束不同,渠基土冻结时兼有冻胀和挤压致密的过程。具体地,在渠底及坡脚土体受挤压作用强烈,而渠坡土体几乎不受周围土体挤压,土体内部应力及其复杂,值得深入研究。

(3) 衬砌结构刚度较土体大, 结构整体性较强, 限制了土体的不均匀冻胀, 因此衬砌渠道冻胀量小于渠基土最大冻胀量且大于渠基土最小冻胀量; 因此, 渠基土不均匀冻胀对衬砌结构产生不均匀冻胀力, 使衬砌结构各部位冻胀位移方向与大小不同。但因衬砌结构的整体性强, 使渠基土冻胀与衬砌位移并不同步, 造成渠底衬砌结构与土体脱空, 悬空衬砌受渠坡衬砌拖拽作用和重力作用产生偏心受拉, 这是导致衬砌结构张拉与弯折破坏的根源。

(4) 衬砌结构传热快, 渗透性低且与土体存在间隙, 在低温下形成冷板效应, 使水分在衬砌结构下方聚集冻结, 并将周围土体排开, 从而在衬砌与基土间形成一层分凝冰层界面, 作为冻结期土体与衬砌板间冻结力与冻胀力传递界面; 分凝冰层厚度也是导致衬砌冻胀位移的组成部分, 在温度升高初期冰层表面融化形成的水膜不断增厚、以致完全消失将使冻结力迅速消失, 从而引起衬砌脱空及滑塌, 进一步形成丧失强度的超饱和泥浆层, 加剧衬砌滑动失稳。

## 参考文献:

- [1] 李安国. 渠道混凝土衬砌的冻害及其防治措施[J]. 陕西水利科技, 1978(3): 47 - 73. (LI An-guo. Frost damage and control measure of canal concrete lining[J]. Shaanxi Water Conservancy Science and Technology, 1978(3): 47 - 73. (in Chinese))
- [2] 王正中. 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, 2004, 20(3): 24 - 29. (WANG Zheng-zhong. Establishment and application of mechanics models of frost heaving damage of concrete lining trapezoidal open canal[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(3): 24 - 29. (in Chinese))
- [3] 王正中, 李甲林, 陈 涛, 等. 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 Zheng-zhong, LI Jia-lin, CHEN Tao, et al. Mechanics models of frost-heaving damage of concrete lining trapezoidal canal with arc-bottom[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(1): 18 - 23. (in Chinese))
- [4] 曹兴山, 陈志猛. 寒区冬季输水渠道冻胀破坏机制与防治——以新疆乌什水库引水渠为例[J]. 地质灾害与环境保护, 2005, 16(4): 405 - 409. (CAO Xing-shan, CHEN Zhi-meng. Prevention and cure of breaking of the water canal in the winter of frigid areas—an example in Wushishui water canal, Xinjiang[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2005, 16(4): 405 - 409. (in Chinese))
- [5] TALAMUCCI F. Freezing processes in porous media: formation of ice lenses, swelling of the soil[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2003, 37(5): 595 - 602.
- [6] PEPPIN S S L, STYLE R W. The physics of frost heave and ice-lens growth[J]. Vadose Zone J, 2013, 12(1). (Doi:10.2136/vzj2012.0049)
- [7] HARLAN R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil[J]. Water Resources Research, 1973, 9(5): 1314 - 1324.
- [8] YANG P, KE J, WANG J, et al. Numerical simulation of frost heave with coupled water freezing, temperature and stress fields in tunnel excavation[J]. Computers and Geotechnics, 2006, 33(6): 330 - 340.
- [9] LIU Z, YU X. Coupled thermo-hydro-mechanical model for porous materials under frost action: theory and implementation[J]. Acta Geotechnica, 2011, 6(2): 51 - 65.
- [10] GROENEVELT P H, GRANT C D. Heave and heaving pressure in freezing soils: a unifying theory[J]. Vadose Zone J, 2013, 12(1). (Doi:10.2136/vzj2012.0051)
- [11] ORLANDO B. Andersland. Frozen ground engineering[M]. American: Johnwiley & Sons, 2004: 20 - 25.
- [12] 陈 涛, 王正中, 张爱军. 大 U 形渠道冻胀机理试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(2): 8 - 11. (CHEN Tao, WANG Zheng-zhong, ZHANG Ai-jun. The test for frost heaving damage mechanism in U-shape channel[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 25(2): 8 - 11. (in Chinese))
- [13] 张 茹, 王正中, 陈 涛, 等. 基于非对称冻胀破坏的大 U 形混凝土衬砌渠道力学模型[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(11): 217 - 223. (ZHANG Ru, WANG Zheng-zhong, CHEN Tao, et al. Establishment and application of mechanic models of dissymmetric frost heaving damage of U-shape canal with concrete lining[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2008, 36(11): 217 - 223. (in Chinese))
- [14] 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(1): 5 - 16. (LI An-guo, CHEN Rui-ji, DU Ying-ji, et al. Frost heave experiment of canal and force analyze of lining structures[J]. Technique of Seepage Control, 2000(1): 5 - 16. (in Chinese))
- [15] 王正中, 芦 琴, 郭利霞, 等. 基于昼夜温度变化的混凝土衬砌渠道冻胀有限元分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 1 - 7. (WANG Zheng-zhong, LU Qin, GUO Li-xia, et al. Finite element analysis of the concrete lining channel frost heaving based on the changing temperature of the whole

- day[J]. Transactions of the CSAE, 2009, **25**(7): 1 - 7. (in Chinese))
- [16] 王正中, 刘旭东, 陈立杰, 等. 刚性衬砌渠道不同纵缝削减冻胀效果的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(11): 1 - 7. (WANG Zheng-zhong, LIU Xu-dong, CHEN Li-jie, et al. Computer simulation of frost heave for concrete lining canal with different longitudinal joints[J]. Transactions of the CSAE, 2009, **25**(11): 1 - 7. (in Chinese))
- [17] 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 Zheng-zhong, SHA Ji-de, JIANG Yun-jing, 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))
- [18] 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的渠道冻胀数值模拟[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]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, **45**(4): 497 - 503. (in Chinese))
- [19] 孙厚超, 杨平, 王国良. 冻黏土与结构接触界面层单剪力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2015, **31**(9): 65 - 70. (SUN Hou-chao, YANG Ping, WANG Guo-liang. Monotonic shear mechanical characteristics and affecting factors of interface layers between frozen soil and structure[J]. Transactions of the CSAE, 2015, **31**(9): 65 - 70. (in Chinese))
- [20] 孙厚超, 杨平, 王国良. 冻土与结构接触界面层力学试验系统研制及应用[J]. 岩土力学, 2014, **35**(12): 297 - 302, 304. (SUN Hou-chao, YANG Ping, WANG Guo-liang. Development of mechanical experimental system for interface layer between frozen soil and structure and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(12): 297 - 302, 304. (in Chinese))
- [21] ZHAO Hui-xin, WU Zhi-qin, LI Zhao-yu. Experimental study on frost heave of silty clay in seasonally frost soil regions[J]. Procedia Engineering, 2012, **28**(6): 282 - 286.
- [22] PENNER E. Aspects of ice lens growth in soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 1986, **13**(1): 91 - 100.
- [23] 徐学祖, 邓友生. 冻土中水分迁移的实验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 36 - 45. (XU Xue-zu, DENG You-sheng. Experiment study of moisture transfer in frozen soil[M]. Beijing: Science Press, 1991: 36 - 45. (in Chinese))
- [24] 陈继, 程国栋, 张喜发. 分层冻胀量的观测方法研究[J]. 冰川冻土, 2004, **26**(4): 466 - 473. (CHEN Ji, CHENG Guo-dong, ZHANG Xi-fa. Study on the observation of delamination frost-heave amount[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, **26**(4): 466 - 473. (in Chinese))
- [25] 李洪升, 刘增利, 梁承姬. 冻土水热力耦合作用的数学模型及数值模拟[J]. 力学学报, 2001, **33**(5): 621 - 629. (LI Hong-sheng, LIU Zeng-li, LIANG Cheng-ji. Mathematical model for coupled moisture, heat and stress field and numerical simulation of frozen soil[J]. Acta Mechanica Sinica, 2001, **33**(5): 621 - 629. (in Chinese))
- [26] LI Shuang-yang, ZHANG Ming-yi, TIAN Yi-bin, et al. Experimental and numerical investigations on frost damage mechanism of a canal in cold regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, **116**: 1 - 11.
- [27] GILPIN R R. A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soils[J]. Water Resources Research, 1980, **16**(5): 918 - 930.
- [28] ALAN W. Rempel Microscopic and environmental controls on the spacing and thickness of segregated ice lenses[J]. Quaternary Research, 2011, **75**(2): 316 - 324.
- [29] A-W Rempel. Formation of ice lenses and frost heave[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, **112**(F2): 1 - 17.