

不同地下水位下渠基冻胀规律与保温板适宜厚度确定

郭富强^{1,2}, 史海滨^{1*}, 程满金², 高文慧²

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;
2. 内蒙古自治区水利科学研究院, 呼和浩特 010060)

摘要:为探明河套灌区不同地下水位条件下渠基冻胀的差异, 了解地下水位变化对渠基土壤水分迁移和力学性能的影响, 该文通过建立不同地下水位冻胀试验平台并结合原型渠道, 分析了不同地下水位对铺设不同厚度聚苯板的渠基冻胀的影响, 阐述了冻胀率和截面弯矩沿渠坡的分布规律, 提出了不同地下水位下聚苯板适宜铺设厚度的理论计算公式。试验得出, 每降低1 cm地下水位, 渠基冻胀量减小0.15 cm。当地下水位降低0.5~1.0 m后, 削减冻胀率为71%~83.8%。地下水位下降有效阻止或延缓了土壤毛细水的上升, 降低了0~30 cm土层的土壤水分, 有效阻止了冻结锋面水分的迁移, 减小了土体中冰夹层的形成, 从而降低了土体的冻胀变形。并且, 渠道的冻胀破坏部位随着地下水位的不同而发生变化。该研究可为北方季节性冻土区骨干渠道保温防冻胀技术研究提供科学依据和技术支撑。

关键词:地下水; 水位; EPS; 冻胀理论; 截面弯矩; 水分迁移规律

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.19.013

中图分类号: S143; S278

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-19-0095-09

郭富强, 史海滨, 程满金, 高文慧. 不同地下水位下渠基冻胀规律与保温板适宜厚度确定[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 95-103. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.19.013 http://www.tcsae.org

Guo Fuqiang, Shi Haibin, Cheng Manjin, Gao Wenhui. Law of frost heave of canal foundation and appropriate thickness of insulation board under different groundwater levels[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(19): 95-103. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.19.013 http://www.tcsae.org

0 引言

河套灌区属于温带大陆性干旱、半干旱气候带。冬季漫长寒冷, 为季节冻土区。渠基冻融过程一般在10月中旬封冻, 翌年5月下旬融通, 个别年份可至6月上旬融通, 形成一个冻融周期。受灌溉水的影响, 灌区地下水位较高, 由于受气温、土质、地下水位等方面原因的影响, 灌区成为冻胀强烈的区域。由于负温的作用, 混凝土板衬砌渠道在未采取任何防冻胀措施保护的情况下, 经过几个冻融周期的反复交替, 灌区已建的衬砌渠道与防渗工程都不同程度地遭受到冻胀破坏。渠道冻胀破坏严重, 衬砌渠道混凝土面板大量出现了架空、隆起局部坍塌等破坏现象的发生。

在渠道冻胀方面, 中国已经有较充分的研究。张俊英^[1]通过大型有限元分析的方法对梯型混凝土衬砌渠道在冻结期间温度场、位移场和应力场进行了模拟研究。王婧等^[2-3]对现浇混凝土渠道冻胀过程进行原型观测试验, 探究了渠道衬砌层冻胀破坏变形的产生机理。王正中^[4-5]将渠坡板视做简支梁提出了梯形渠道衬砌冻胀破

坏的力学模型, 解出了渠坡衬砌板控制内力及最大拉应力计算公式, 并对刚性衬砌渠道不同纵缝削减冻胀效果进行了数值模拟。肖旻等^[6]推导出了受地下水位影响的渠道渠基冻胀强度、冻深和弯矩分布的计算公式, 从整体和局部定量分析了梯形渠道衬砌冻胀力分布的不均匀性。卞晓琳等^[7]认为冻胀的实质就是冻土中水分迁移引起的宏观表现。刘志斌等^[8-10]分析了渠道冻胀破坏机理, 并通过理论公式只计算出了特定地下水位梯形渠道聚苯板的适宜铺设厚度。虽然中国目前在渠道防冻胀方面取得了大量试验研究成果^[11-18], 但在不同地下水位对渠道渠基冻胀的影响方面研究甚少, 目前中国没有建立在不同地下水位平台基础上的相关冻胀试验及研究。因此, 本文以内蒙古河套灌区骨干渠道和冻胀试验平台为研究对象, 分析不同地下水位对渠道冻胀影响效应, 并从土壤水分变化和力学角度阐述了梯形渠道的冻胀变化规律。

1 材料与方法

1.1 试验区基本情况

试验区位于河套灌区永济灌域南边分干渠二闸西南方向8 km+200 m处。年平均气温6.9℃, 平均相对湿度40%~50%, 多年平均降雨量为144.2 mm, 温差较大, 光照充足, 年日照时数为3 100~3 300 h, 试验场地质为重粉质壤土, 属强冻胀性土壤, 冻结历时180~240 d左右, 冻结指数为536~3 450 (℃·d), 冻深在70~120 cm之间。

收稿日期: 2018-03-23 修订日期: 2018-08-08

基金项目: 内蒙古自治区水利科研专项经费项目(NSK-2016-S9)

作者简介: 郭富强, 男, 内蒙古呼和浩特市人, 工程师, 博士生, 主要从事节水灌溉理论与技术及渠道保温防冻胀技术研究。

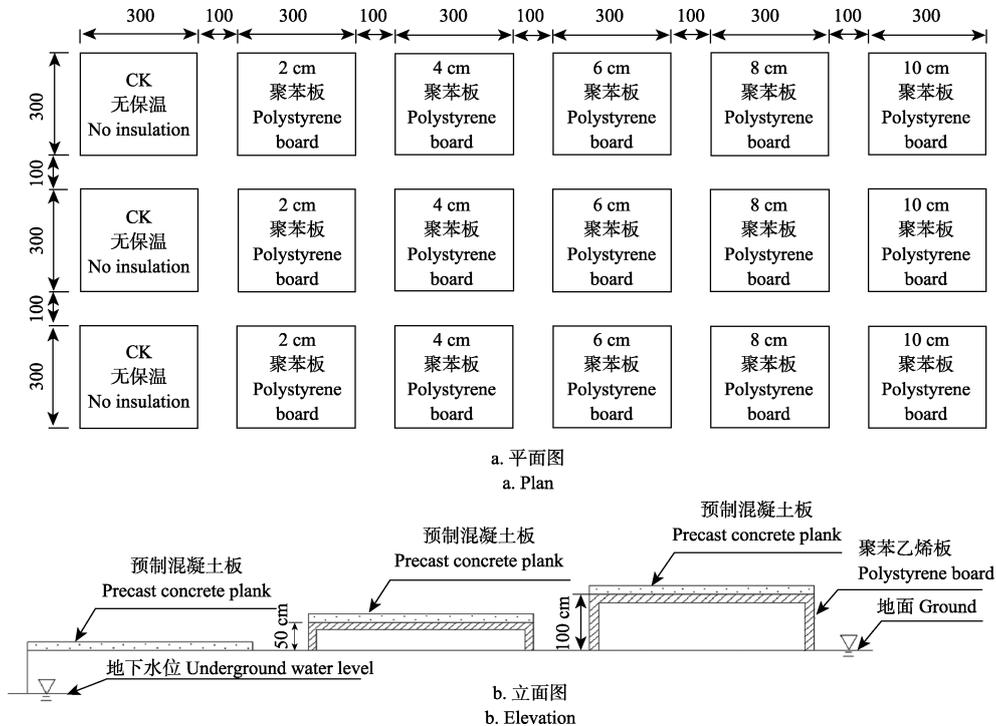
Email: guofu101@163.com

*通信作者: 史海滨, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与新技术应用。Email: nmndshb@126.com

1.2 试验设计

在试验区内设置 3 种不同地下水位的试验平台，每个平台面积 40 m×6 m，平台一与地面齐平，平台二相对高程为 0.5 m，平台三相对高程为 1.0 m，3 种平台土质与容重均相同。3 种平台上分别设置 6 块 3 m×3 m 的试块，

上面铺设预制混凝土板，其中 1 块为对比处理，不铺设保温板，其他 5 块分别铺设 2、4、6、8 和 10 cm 厚聚苯乙烯保温板。平台二与平台三侧面分别垂直铺设 6 cm 聚苯乙烯保温板，防止外界低温对试块基土温度的影响。平面和立面布置图如图 1 所示，试验处理设计表如表 1 所示。



注：50、100 cm 为地面到预制混凝土板下表面的距离，文中数字单位为 cm。

Note: 50 and 100 cm are the distance from ground to the under surface of precast concrete planks and the unit of the number in the map is centimeters.

图 1 不同地下水位平台布置图

Fig.1 Layout of different groundwater levels platform

在本试验中，各个试块四周均垂直铺设了聚苯乙烯保温板，保温板厚为 6 cm，减少了周边热交换，保证热运动是一维，从而削减水平方向冻胀变形对试块垂直方向变形的影响。另外，试块之间（间隔 1 m 的范围内）均对 0~30 cm 的土进行了换填，换填为砂土，减少外界冻胀对试块基土的影响，为只研究各试块基土在垂直一维冻胀变形提供保证。另外，每个试块中同一层地温均对角线埋置了 3 组探头，间距 1 m，埋设深度分别为保温板下、混凝土板下 10 cm、混凝土板下 30 cm、混凝土板下 50 cm，经同一层地温对比分析，差值小于 5%，表明外界对试块水平方向冻胀影响较小，可忽略不计。

试验观测内容主要包括冻胀量、土壤含水率、地下水位和地温等。地温采用 18B20 温度传感器，观测精度 ±0.5 °C，传感器埋设深度共分 5 层，每 10 cm 一层，每层布设 1 个传感器。通过自动化采集系统及 GPRS 网络完成地温数据的监测、传输、储存。每 30 min 采集 1 次数据，采集系统放在保护房内，采用水准仪观测不同保温处理的冻胀变形量。分别在封冻前、最大冻深时和冻融结束后，采用人工钻孔取样烘干法测定不同深度的土壤含水率，地下水观测井采用自计水位计自动采集水位变化。

2 结果与分析

2.1 不同地下水位对基土冻胀变形影响

通过 2015 年 11 月至 2016 年 4 月一个完整冻融期的观测，绘制出 3 种地下水位条件下无保温处理冻胀量变化过程线如图 2 所示。

由图 2 可以看出，从基土 11 月下旬开始发生冻胀变形，并随着时间的变化冻胀量逐渐增大；到 2 月中下旬时进入最大冻胀期，之后随着气温的回升，基土冻胀量又逐渐减小；到 4 月中旬，0.5 m 平台和 1 m 平台 2 种处理下的冻胀基本消除，无残余变形，而地面高程条件下

表 1 不同地下水位平台试验处理设计

Table 1 Design table for experimental treatment of different underground water level platforms

高程设置 Elevation Settings	地下水埋深 (冻结初期) Ground-water buried depth (initial freezing period)/m	结构型式 Structural type	聚苯板厚度 Thickness of polystyrene board/cm
地面高程	1.28		
0.5 m 平台	1.78	预制板+聚苯板	0、2、4、 6、8、10
1.0 m 平台	2.28		

存在残余变形，残余变形量为 1 cm。在整个冻融期内，0.5 m 平台和 1.0 m 平台 2 种地下水位条件下冻胀量小于地面高程条件下的冻胀量。

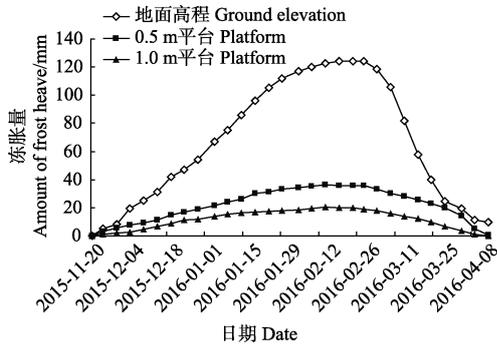


图 2 不同水位下无保温处理基土冻胀量变化过程线
Fig.2 Change process line of soil frost heave of no heat preservation treatment under different groundwater level

2015 年 12 月冻结初期实测地面高程条件下地下水位埋深为 1.28 m，0.5 m 平台地下水位埋深为 1.78 m，1.0 m 平台地下水位埋深为 2.28 m。计算出冻融期内 3 种地下水位条件下铺设 2~10 cm 保温板处理的最大冻胀量柱状图如图 3 所示。

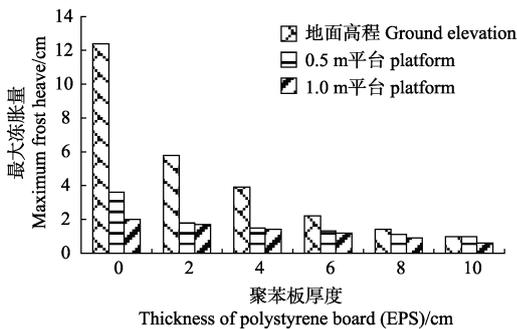


图 3 不同厚度 EPS 板处理基土最大冻胀量
Fig.3 Maximum frost heave of base soil under different thickness EPS plate

由图 3 可以看出，随着保温板厚度的增加，最大冻胀量逐渐减小，并且铺设的保温板越厚，地下水位对基土冻胀影响越小，该研究结果与文献[19-22]相符。

表 2 为不同地下水位条件下最大冻胀量与削减冻胀量。由表 2 可知，与地面条件下相比，当地下水位相对降低 0.5~1.0 m 后，削减冻胀量为 8.8~10.4 cm，冻胀削减率为 71%~83.8%。可见，降低地下水位可以明显减小基土冻胀量。另外计算出每降低 1 cm 地下水位，基土冻胀量可减小 0.15 cm。表明在实际工程运用中可以通过降低地下水位来达到减小基土冻胀的目的。

2.2 地下水位对基土土壤含水量的影响

2.2.1 不同地下水位土壤水分分布规律

对最大冻结期内 3 种不同地下水位下无保温处理平台的土壤含水率进行取土测定，取样位置位于试块中间，同一层平行取样 3 个，样点间隔 10 cm，取样时间为 2016 年 2 月 11 日，取样深度为 0~50 cm，每 10 cm 一层，每个平台共计 15 个样本数。

表 2 不同地下水位条件下最大冻胀量与削减冻胀量
Table 2 Maximum frost heave and frost heave reduction under different groundwater level

处理 Treatment	地下水埋深 Ground-water buried depth/m	最大冻胀量 Biggest amount of frost heave/cm	削减冻胀量 Cut amount of frost heave/cm	冻胀削减率 Cut rate of frost heave/%	每降低 1 cm 水位冻胀量减少值 Reduction of frost heave for every 1cm reduction in water level/cm	平均每降低 1 cm 水位冻胀量减少值 Average reduction of frost heave of per 1 cm water level decrease/cm
地面高程	1.28	12.4	\	\	\	\
0.5m 平台	1.78	3.6	8.8	71.0	0.18	0.15
1.0m 平台	2.28	2	10.4	83.8	0.11	0.15

运用 Suffer.11 软件绘制出地面高程、0.5 m 平台和 1.0 m 平台 3 种地下水位条件下 0~50 cm 土层土壤含水率的分布图如图 4 所示。

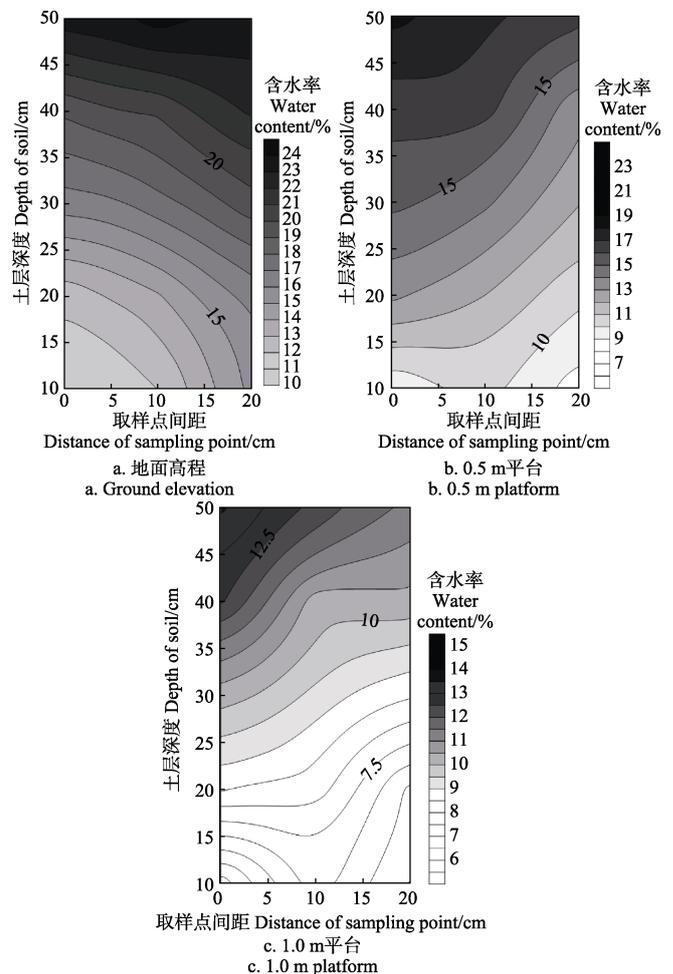


图 4 不同地下水位条件下土壤含水率分布
Fig.4 Soil water content distribution under different groundwater level

由于测定的数据是同一层的平行 3 个点的含水率数据，因此采用 Suffer.11 软件绘制的土体剖面含水率分布结果具有较强的可靠性和代表性。由图 4 可以看出，随着地下水位埋深的增大，0~50 cm 土壤水分在逐渐减小，

地下水位的变化对 0~30 cm 的土壤水分影响最大。表明地下水位下降有效阻止或延缓了土壤毛细水的上升, 降低了表层以下 30 cm 土层的土壤含水率。

2.2.2 地下水位对基土土壤含水率迁移的影响

计算出 3 种不同高程处理 0~50 cm 土层在封冻前的土壤含水率, 并计算出在最大冻结期和融通后的水分迁移值如表 3 所示。

表 3 3 种不同高程处理土壤水分迁移变化
Table 3 Soil water migration and change of three different elevation treatments

处理 Treatment	土层深度 Soil depth/cm	封冻前含水率 Moisture content before freezing/%	最大冻结期迁移率 Maximum freezing period mobility/%	消融期迁移率 Migration rate during ablation/%
地面高程	0~30	20.17	+51.5	-32.8
	>30~50	23.45	-42.5	+39.6
0.5 m 平台	0~30	15.27	+12.6	-22.9
	>30~50	18.56	-14.9	+13.2
1.0 m 平台	0~30	9.24	+4.3	-6.5
	>30~50	11.52	-7.1	+3.67

注: 迁移率等于冻结期(融化期)含水率减去初始含水率。“+”表示水分向上迁移;“-”表示水分向下迁移。

Note: Mobility was equal to water content during freezing period (melting period) minus initial water content. "+" represents the upward migration of water; "-" indicates a downward movement of water.

通过表 3 可以看出, 3 种高程处理 0~50 cm 土壤含水率在封冻前-最大冻结期-消融期具有相同的变化规律。在封冻前-最大冻结期, 0~30 cm 土层土壤含水率在增大, 而>30~50 cm 含水率在减小, 表明在冻结过程中土壤水分由下层土层向上层发生了迁移; 在最大冻结期-消融期, 0~30 cm 土层土壤含水率在减小, 而>30~50 cm 含水率在增大, 表明在消融过程中土壤水分由上层土层向下层发生了迁移。并且随着地下水埋深的增大, 土壤水分迁移率逐渐减小。表明降低地下水位可以有效阻止冻结锋面水分的迁移, 减小土体中冰夹层的形成, 从而降低了土体的冻胀变形^[23-25]。

在本试验中, 实际上是运用基土抬升措施来模拟地下水位下降。为了说明基土抬升与地下水位下降 2 种条件对于基土含水率及冻胀影响的一致性, 本试验对实际地下水位下降和基土抬升 2 种条件下 0~50 cm 土壤水分迁移进行了研究。

图 5 给出了 2015 年 11 月至 2016 年 4 月一个完整冻融期内试验区地面高程条件下地下水位埋深变化过程线。由图 5 得出地下水位埋深为 1.28 m 的时间为 2015 年 12 月 20 日, 根据地下水位监测数据, 2016 年 1 月 10 日对应的水位埋深为 1.78 m。由上述 2 个不同时期 0~50 cm 含水率数据计算出地下水位实际降低 50 cm 的迁移率。

再根据 2015 年 12 月 20 日地面高程和 0.5 m 平台(抬高 50 cm) 2 种地下水位条件下 0~50 cm 土层土壤含水率数据计算出地面抬高 50 cm 后的水分迁移率。计算结果如表 4 所示。

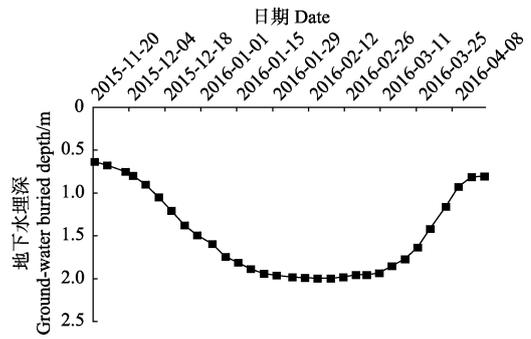


图 5 地面高程条件下地下水埋深变化过程线
Fig.5 Variation of ground-water buried depth under ground elevation conditions

表 4 不同地下水位设置条件下地表以下 50 cm 水分迁移量
Table 4 Water migration amount of 50 cm below earth surface under different groundwater level settings

条件 Condition	土层深度 Soil depth/cm	不同水位土壤含水率 Soil water content at different water level /%		迁移量 Migration amount/%	迁移率 Mobility/%
		1.28 m	1.78 m		
地下水位实际下降 Actual decrease of groundwater level	0~10	23.64	21.80	-1.84	-7.77
	>10~20	23.86	21.00	-2.86	-11.99
	>20~30	25.75	22.13	-3.62	-14.07
	>30~40	30.60	25.30	-5.30	-17.32
	>40~50	33.90	27.40	-6.50	-19.17
基土抬升 Base soil raised	0~10	23.64	21.30	-2.34	-9.88
	>10~20	23.86	21.61	-2.26	-9.45
	>20~30	25.75	22.93	-2.82	-10.97
	>30~40	30.60	24.77	-5.83	-19.07
	>40~50	33.90	25.89	-8.01	-23.64

通过表 4 可以看出, 地下水位实际下降和地面抬高 2 种条件下 0~50 cm 土壤水分都在减小, 并且迁移量随着深度的增加而增大, 迁移率相差 1.75%~4.46%, 说明无论地面抬高还是地下水位下降, 土壤水分运移具有一致变化规律。另外, 冻胀主要是由于水分迁移导致的, 所以地下水位下降和基土抬高二者条件下水分迁移对于基土冻胀的作用也是相一致的。

2.3 不同地下水位适宜铺设的 EPS 保温板厚度理论计算

通过地温系统自动化监测数据, 统计出 2015~2016 年度冻融期内地面高程、0.5 m 平台和 1.0 m 平台 3 种地下水位条件下铺设的 2、4、6、8 和 10 cm 聚苯乙烯板(EPS)板下最低温度平均值如下表 5 所示。

表 5 3 种地下水位条件下铺设 EPS 板下最低温度
Table 5 Lowest temperature under EPS plate under three kinds of groundwater level

处理 Treatment	EPS 板厚度 Thickness of EPS/cm				
	2	4	6	8	10
地面高程	-2.3	-0.6	-0.1	0.2	1.3
0.5 m 平台	-1.2	-0.3	0.1	0.5	1.9
1.0 m 平台	-0.8	-0.1	0.4	0.8	2.2

℃

拟合出不同地下水位条件下保温板厚度和板下最低温度的关系式如公式 (1)、公式 (2) 和公式 (3) 所示。

地下水位为 1.28 m 时

$$Y = -0.021 2X^2 + 0.666 5X - 3.358 \quad R^2 = 0.950 6 \quad (1)$$

地下水位为 1.78 m 时

$$Y = 0.015 4X^2 + 0.174 7X - 1.532 \quad R^2 = 0.963 8 \quad (2)$$

地下水位为 2.28 m 时

$$Y = 0.022 1X^2 + 0.074 3X - 1.008 \quad R^2 = 0.978 1 \quad (3)$$

式中 X 为铺设的聚苯板厚度 (cm), Y 为板下最低温度 ($^{\circ}\text{C}$);

当保温板下无负温时, 即 $Y=0$ 时, 分别计算出 3 种不同地下水位条件下适宜铺设的聚苯板厚度为

地下水位为 1.28 m 时, $X=6.3$ (cm);

地下水位为 1.78 m 时, $X=5.8$ (cm);

地下水位为 2.28 m 时, $X=5.2$ (cm)。

将计算出的聚苯板适宜铺设厚度与地下水位埋深进行数据拟合, 得出不同地下水位条件下聚苯板适宜铺设厚度的理论计算公式如公式 (4) 所示。

$$Y = -1.1X + 7.724 7 \quad (4)$$

式中 X 为地下水位埋深 (m), Y 为聚苯板适宜的铺设厚度 (cm)。

由公式 (4) 可以看出, 预制板条件下聚苯板的适宜铺设厚度与地下水位埋深呈线性关系, 聚苯板的适宜铺设厚度随着地下水位埋深的增大而逐渐减小。

采用河套灌区典型渠道实际工程中应用的聚苯板铺设厚度对公式 (4) 进行验证。河套灌区目前采用聚苯板的渠道较普遍, 本文调查了河套灌区永刚分干渠、杨家河干渠和西济支渠 3 种不同地下水位的渠道采用的聚苯板铺设厚度如表 6 所示。

表 6 实际工程中应用的聚苯板铺设厚度
Table 6 Thickness of polystyrene board laying applied in practical engineering

渠道名称 Channel Name	多年平均 地下水位埋深 Average buried depth of ground- water for many years	实际工程采用的 聚苯板厚度 Thickness of polystyrene board used in practical engineering/cm	理论计算 结果 Thickness of theoretical calculation results/cm	相对误差 Relative error/%
永刚分干渠	1.5	6	6.07	1.17
杨家河干渠	1.8	6	5.74	4.33
西济支渠	2.1	6	5.42	9.67

将公式 (4) 计算的结果与河套地区实际工程中应用的聚苯板铺设厚度进行对比可知, 理论计算的铺设厚度与 3 条渠道实际铺设的聚苯板厚度的相对误差为 1.17%~9.67%。说明该公式计算的结果与实际工程中应用情况较为吻合。在实际渠道工程施工中, 为方便施工, 在选取聚苯板的厚度时一般都取 2 cm 的整数倍, 所以根据理论公式计算出来的结果均接近于实际情况。

公式 (4) 是根据河套地区特定的土质和气候条件经过多重拟合得出的理论公式, 其适用范围仅为内蒙古河套地区, 适用条件为预制混凝土板衬砌渠道下的保温板厚度的理论计算。运用该公式可以定性分析地下水位与

铺设保温板厚度的关系, 并为定量计算保温板厚度时提供理论参考。

3 不同地下水位埋深原型渠道冻胀变化规律

3.1 原型渠道概况

南边分干渠位于内蒙古河套灌区境内, 为 C20 预制混凝土板衬砌梯型渠道, 试验段铺设 4~8 cm 厚度聚苯乙烯板, 渠深 $H=3.0$ m, 底宽 $B=5.2$ m, 坡比 $m=1:1.5$, 观测期最大冻深 0.76 m, 冻结指数 $I=1 450$ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$), 观测期为 2013~2015 年。

3.2 不同地下水位渠基冻胀率沿断面的分布规律

3.2.1 渠道基土冻胀率理论公式

根据相关研究^[6], 冻胀率与地下水位之间的关系为:

$$\eta(z) = a \cdot e^{-b \cdot z} \quad (5)$$

式中 $\eta(z)$ 为冻胀率, %; z 为计算点至地下水位的距离, cm; a 、 b 为与特定地区特定气象、水分和土质有关的经验参数。内蒙古河套灌区南边渠试验段土质为黏土, 根据相关资料^[26-30], a 取 60, b 取 0.015。

在特定的渠道环境条件下, 得到不同地下水位条件下冻胀强度不均匀分布的计算公式如下:

$$\eta(x) = a \cdot e^{-b \cdot z(x)} \quad (6)$$

式中 x 为计算点沿坡面至坡顶的距离, cm; $\eta(x)$ 为各点基土冻胀强度, %; $z(x)$ 为各点至地下水位的距离, cm。

3.2.2 不同地下水位渠基冻胀率沿断面的分布规律

由于本试验中涉及地下水位在渠底之下和地下水位在渠底之上 2 种情形, 所以在计算不同地下水位埋深渠道延坡面至渠顶各点的冻胀率分 2 种情形进行计算。

1) 当地下水位埋深 $h=128, 178, 228$ 和 278 cm 时:

①计算点 x 位于地下水位下时, 计算点至水位的距离 $z(x)=300-h-0.55x$, 冻胀率计算式为

$$\eta(x) = a \cdot e^{-b \cdot z(x)} = 60 \times e^{-0.015 \cdot (300-h-0.55x)} \quad (7)$$

②计算点 x 位于地下水位上时, 计算点至水位的距离 $z(x)=h-(300-0.55x)$, 冻胀率计算式为

$$\eta(x) = a \cdot e^{-b \cdot z(x)} = 60 \times e^{-0.015 \cdot (h-300+0.55x)} \quad (8)$$

2) 当地下水位埋深 $h=328$ cm 时:

计算点 x 均位于水位以上, 计算点至水位的距离 $z(x)=328-(300-0.55x)$, 冻胀率计算式为

$$\eta(x) = a \cdot e^{-b \cdot z(x)} = 60 \times e^{-0.015 \cdot (28+0.55x)} \quad (9)$$

根据试验取得资料和公式 (7)~(9) 得到南边分干渠不同地下水位条件下 (1.28、1.78、2.28、2.78 和 3.28 m) 渠道基土冻胀率沿坡面的变化过程线如图 6 所示。由图 6 可以看出, 基土冻胀率分布与地下水位埋深有着直接的关系。当地下水位低于渠底时 (地下水位埋深为 3.28 m), 渠道基土冻胀最大处位于渠坡脚处, 并沿着坡面冻胀率逐渐减小。当地下水位高于渠底时, 渠坡冻胀最大处位于渠坡下部 1/3 处, 并且渠坡最大冻胀部位随着地下水埋深减小而逐渐向上转移。当地下水埋深较浅时 (地下水位为 1.28 m), 渠道发生最大冻胀部位位于渠坡中间部位。

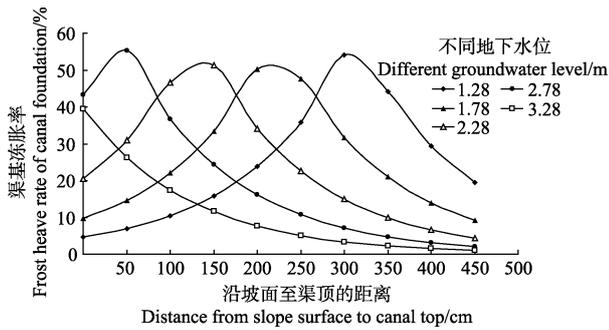


图6 不同地下水位渠基冻胀率沿坡面变化过程线

Fig.6 Frost heave rate of base soil in different groundwater level along the slope

3.3 不同地下水位渠基截面弯矩沿断面的分布规律

在计算渠基截面弯矩时, 将渠坡板视为简支梁进行计算。根据材料力学计算方法计算出渠道坡板各截面弯矩并简化得其沿断面的分布规律。

$$M(x) = k_1 \cdot x \cdot a \cdot e^{-b \cdot z} \cdot [f(bh) - f(xb \sin \theta)] \quad (10)$$

其中

$$f(bh) = (e^{bh} - 1) / (bh)$$

$$f(xb \sin \theta) = (e^{xb \sin \theta} - 1) / (xb \sin \theta)$$

$$k_1 = (l \cdot E_f) / (bh)$$

式中 h 为渠道深度, cm; $M(x)$ 为截面弯矩, (kN·m); E_f 为冻土弹性模量, 根据相关研究成果, 冻土层在冬季最低温度时的弹性模量取 3.8 MPa; a 、 b 为特定土质的经验参数, 取值同上。

公式 (10) 是以地下水位在衬砌底板以下为基础得出的, 本文中涉及地下水位位于渠底之下和渠底之上 2 种情形, 因此在计算弯矩时需要分情况分别进行计算。衬砌板受冻胀法向冻胀力分布计算公式为

$$q(x) = a \cdot E_f \cdot e^{-b \cdot z(x)}$$

式中 a 、 b 为参数, E_f 为冻土弹性模量, x 为从坡顶至坡脚的距离, cm; Z_0 为地下水位埋深, cm; h 为渠道深度, cm, θ 为渠坡板倾角。

当 $Z_0 > h$, 即地下水位埋深大于渠道深度时, $q(x) = a \cdot E_f \cdot e^{-b \cdot (z_0 - x \sin \theta)}$, 坡顶的法向冻胀力为 $q(0) = a \cdot E_f \cdot e^{-b \cdot z_0}$, 截面弯矩

$$M(x) = \frac{x \cdot l}{b \cdot h} \cdot q(0) \cdot [f(bh) - f(xb \sin \theta)] = \frac{l \cdot E_f}{b \cdot h} \cdot x \cdot a \cdot e^{-b \cdot z_0} [f(bh) - f(xb \sin \theta)] \quad (11)$$

当 $Z_0 < h$, 且 $x \cdot \sin \theta < Z_0$ 时, 即地下水位埋深小于渠道深度, 地下水位以上的渠坡板各点法向冻胀力 $q(x) = a \cdot E_f \cdot e^{-b \cdot (z_0 - x \sin \theta)}$, 此时渠坡顶法向冻胀力 $q(0) = a \cdot E_f \cdot e^{-b \cdot z_0}$, 截面弯矩

$$M(x) = \frac{l \cdot E_f}{b \cdot h} \cdot x \cdot a \cdot e^{-b \cdot z_0} [f(bh) - f(xb \sin \theta)] \quad (12)$$

当 $Z_0 < h$, 且 $x \cdot \sin \theta > Z_0$ 时, 即地下水位埋深小于渠

道深度, 地下水位以下的渠坡板各点法向冻胀力 $q(x) = a \cdot E_f \cdot e^{-b \cdot (x \sin \theta - z_0)}$, 此时渠坡顶法向冻胀力 $q(0) = a \cdot E_f \cdot e^{-b \cdot z_0}$, 截面弯矩

$$M(x) = \frac{l \cdot E_f}{b \cdot h} \cdot x \cdot a \cdot e^{-b \cdot z_0} [f(bh) - f(xb \sin \theta)] \quad (13)$$

在本文计算中, 当地下水位埋深高于渠底时, 分段计算的渠坡板各点的截面弯矩。

由式 (11) ~ 式 (13) 计算出南边分干渠不同地下水位埋深时渠坡板沿坡面的弯矩分布图如图 7 所示。

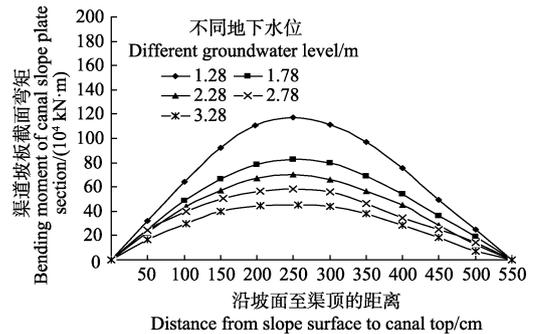


图7 不同地下水位埋深渠坡板截面弯矩图

Fig.7 Section bending moment diagram of canal slope plate under different groundwater level

由图 7 可以看出, 截面弯矩从渠道底部沿着渠坡面呈先增后减的抛物线型变化趋势, 渠道坡板最大弯矩出现在渠坡板的下部 1/3~1/2 处; 地下水位埋深 1.28 m 时, 弯矩值较大, 随着地下水位埋深的增大, 最大弯矩逐渐减小; 在地下水位埋深从 1.28 m 降到 1.78 m 时, 最大弯矩减小幅度最大, 而从 1.78 m 降到 3.28 m 时, 最大弯矩减小幅度较小, 表明: 当地下水位高于渠底时, 地下水位对渠坡板弯矩影响较大, 地下水位埋深越浅, 最大弯矩越大, 对渠坡板冻胀破坏也越严重; 当地下水位低于渠底时, 对渠坡板弯矩影响及渠道破坏影响较小。

4 结论

本文通过设置不同冻胀试验平台, 并结合原型渠道分析不同地下水位条件下基土冻胀量、土壤含水率、地温等变化规律, 得出以下结论:

1) 当地下水位相对降低 0.5 m 后, 削减冻胀率为 71%; 当地下水位相对降低 1 m 后, 削减冻胀率达到 83.8%, 降低地下水位可以显著减小基土冻胀量。计算出每降低 1 cm 地下水位, 基土冻胀量可减小 0.15 cm。

2) 降低地下水位可以有效阻止冻结锋面水分的迁移, 减小土体中冰夹层的形成, 从而降低了土体的冻胀变形。在冻结过程中土壤水分向上层发生了迁移, 在消融过程中土壤水分向下层发生了迁移。随着地下水埋深的增大, 土壤水分迁移率逐渐减小。

3) 渠道坡板最大弯矩出现在渠坡板的下部 1/3~1/2 处, 并随着地下水位埋深的增大, 最大弯矩逐渐减小。地下水位埋深越浅, 渠坡板最大弯矩越大, 对渠坡板冻

胀破坏也越严重。当地下水位低于渠底时, 对渠坡板弯矩影响及渠道破坏影响较小。

4) 地下水位实际下降和地面抬升 2 种条件下 0~50 cm 土壤水分都在减小, 并且迁移量随着深度的增加而增大, 迁移率相差 1.75%~4.46%, 说明无论地面抬升还是地下水位下降, 土壤水分运移具有一致变化规律。

本文通过建立冻胀试验平台并结合原型渠道, 分析了不同地下水位条件下基土冻胀变形、基土含水率、地下水位、基土地温等变化规律, 推导出了河套地区特定的土质和气候条件下不同地下水位埋深时聚苯板适宜铺设厚度的理论计算公式。该公式是经过多重拟合得出的理论公式, 其适用范围仅为内蒙古河套地区, 适用条件为铺设预制混凝土板下的保温板厚度计算。运用该公式可以定性分析地下水位与铺设保温板厚度的关系, 并为定量计算不同地下水位时保温板铺设厚度提供理论参考。本试验成果可为北方骨干渠道保温防冻胀技术研究提供科学依据和技术支撑。

[参 考 文 献]

- [1] 张俊英. 梯型砼衬砌渠道温度应力应变的有限元分析[J]. 石河子大学学报, 2010, 28(2): 251—255.
Zhang Junyin. The finite element analysis of the temperature, stress and deformation of trapezoidal canal with concrete lining[J]. Journal of Shihezi University, 2010, 28(2): 251—255. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王婧. 汾河灌区现浇混凝土渠道衬砌冻胀试验研究[J]. 山西水利, 2010(1): 53—54.
Wang Jing. The experimental study on frost heave lining of cast-in-place concrete channel in Fenhe irrigation area[J]. shanxi water resources, 2010, (1): 53—54. (in Chinese with English abstract)
- [3] 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.
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)
- [4] 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 Zhengzhong. Establishment and application of mechanics models of frost heaving damage of concrete lining trapezoidal open canal[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(3): 24—29. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王正中. 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 Zhengzhong. Computer simulation of frost heave for concrete lining canal with different longitudinal joints[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(11): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [6] 肖旻, 王正中, 刘铨鸿, 等. 考虑地下水位影响的现浇混凝土梯形渠道冻胀破坏力学分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(11): 91—97.
Xiao Min, Wang Zhengzhong, Liu Quanhong, et al. Mechanical analysis on frost heave damage of cast-in-place concrete trapezoidal canal considering influence of groundwater table[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(11): 91—97. (in Chinese with English abstract)
- [7] 卞晓琳, 何平, 施焯辉. 土体冻胀与地下水关系的研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2007(4): 24—27.
Bian Xiaolin, He Ping, Shi Yehui. Research progress on the relationship between soil freezing and groundwater[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007(4): 24—27. (in Chinese with English abstract)
- [8] 刘志斌, 刘建军. 苯板在渠道防冻胀中的应用[J]. 低温建筑技术, 2012, 7: 142—144.
Liu Zhibin, Liu Jianjun. The applicaton of benzene plate in channel expanding[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2012, 7: 142—144. (in Chinese with English abstract)
- [9] 安鹏, 邢义川, 张爱军. 基于部分保温法的渠道保温板厚度计算与数值模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 54—62.
An Peng, Xing Yichuan, Zhang Aijun. Thickness calculation and numerical simulation of insulation board for canal using partial insulation method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(17): 54—62. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李书民, 李振卿, 王建伟. 南水北调工程防冻胀保温层厚度计算方法讨论[J]. 河北水利水电技术, 2000(3): 53—55.
Li Shumin, Li Zhenqing, Wang Jianwei. Discussion on the calculation method of the thickness of the antifreeze extension and temperature retention layer in the South-to-North water diversion project[J]. Hebei Water Conservancy and Hydropower Technology, 2000(3): 53—55. (in Chinese with English abstract)
- [11] 郭瑞, 王正中, 牛永红, 等. 基于 TCR 传热原理的混凝土复合保温衬砌渠道防冻胀效果研究[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 101—106.
Guo Rui, Wang Zhengzhong, Niu Yonghong, et al. Anti-frost heave effect of lining channel with concrete composite insulation based on TCR principle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(20): 101—106. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李亚童, 申向东, 高鑫, 等. 大型灌区现役衬砌模袋混凝土渠道力学性能检验[J]. 中国农村水利水电, 2016(1): 105—108.

- Li Yatong, Shen Xiangdong, Gao Chu, et al. Testing of channel mechanical properties of active duty lining mold-bag-concrete in large irrigation areas[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016 (1):105–108. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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, et al. 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)
- [14] 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): 773–783.
Zhang Ru, Wang Zhengzhong, Mu Shenyuan, et al. Numerical simulation of frost heaving for U canal based on transverse isotropy[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2010, 18(5): 773–783. (in Chinese with English abstract)
- [15] 李寿宁. 苯板在防渗渠道防冻中的试验和应用[J]. *塔里木大学学报*, 2005, 17(1): 53–55.
Li Shouning. Experiments and application of EPS planks to freeze proof and leak proof irrigation ditch[J]. *Journal of Tarim University*, 2005, 17(1): 53–55. (in Chinese with English abstract)
- [16] 武慧芳, 王红雨, 陆立国. 宁夏灌区渠道苯板防冻胀效果及合理厚度研究[J]. *人民黄河*, 2016, 38(6): 149–153.
Wu Huifang, Wang Hongyu, Lu Ligu. Study on anti-frost effect and laying thickness of EPS board lining channels in mingxia irrigation area[J]. *Yellow River*, 2016, 38(6): 149–153. (in Chinese with English abstract)
- [17] 刘雄, 宁建国, 马巍. 冻土地区水渠的温度场和应力场数值分析[J]. *冰川冻土*, 2005, 27(6): 932–938.
Liu Xiong, Ning Jianguo, Ma Wei. Numerical analyses of the temperature and stress fields of channel in frozen soil regions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(6): 932–938. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张文智. 聚苯乙烯泡沫塑料板在渠道防冻胀中的应用[J]. *水利与建筑工程学报*, 2003, 1(2): 56–58.
Zhang Wenzhi. Application of polystyrene foam plastic slabs in frost heaving prevention of canal[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2003, 1(2): 56–58. (in Chinese with English abstract)
- [19] 武慧芳. 宁夏引黄灌区骨干渠道 EPS 保温板厚度优选试验及数值模拟研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2012.
Wu Huifang. Optimization Test and Numerical Simulation Study on the Thickness of EPS Thermoinsulation Plate in Main Channel of Yellow Irrigation Area of Ningxia[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张彦武. 聚苯乙烯泡沫板在渠道防冻胀中的应用[J]. *甘肃水利水电技术*, 2009, 45(1): 7–9.
Zhang Yanwu. Application of polystyrene foam plate in pipeline anti-freeze technology[J]. *Gansu Water Conservancy and Hydropower Technology*, 2009, 45(1): 7–9. (in Chinese with English abstract)
- [21] 盛岱超, 张升, 贺佐跃. 土体冻胀敏感性评价[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(3): 594–605.
Sheng Daichao, Zhang Sheng, He Zuoyue. Sensitivity evaluation of soil frost heave[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(3): 594–605. (in Chinese with English abstract)
- [22] 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.
Li Xuejun, Fei Liangjun, Mu Hongwen. The study of frost-heave mechanism and seepage technical control on U canal[J]. *Agricultural Research in the Arid Area*, 2006, 24(3): 194–199. (in Chinese with English abstract)
- [23] 宋玲, 欧阳辉, 余书超. 混凝土防渗渠道冬季输水运行中冻胀与抗冻胀力验算[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(18): 114–120.
Song Lin, Ou Yanghui, Yu Shuchao. Test of frozen heave and anti-cold heave force in winter water supply operation of concrete impermeable channel[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(18): 114–120. (in Chinese with English abstract)
- [24] 马巍, 王大雁. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [25] 黄继辉, 夏才初, 韩常领, 等. 考虑围岩不均匀冻胀的寒区隧道冻胀力解析解[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, (S2): 3766–3774.
Huang Jihui, Xia Caichu, Han Changling, et al. Analytic solution of freezing force of tunnel in cold zone considering uneven frost heaving of surrounding rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, (S2): 3766–3774. (in Chinese with English abstract)
- [26] 中华人民共和国水利部. 渠系工程抗冻胀设计规范: SL 23-2006[S].
- [27] 中华人民共和国水利部. 渠道防渗工程技术规范: GB/T 50600–2010[S].
- [28] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [29] 过镇海, 张绣琴, 张达成, 等. 混凝土应力-应变全曲线的试验研究[J]. *建筑结构学报*, 1982 (1): 1–12.
Guo Zhenhai, Zhang Xiuqin, Zhang Dacheng, et al. Experimental study on the whole stress-strain curve of concrete[J]. *Journal of Building Structures*, 1982(1): 1–12. (in Chinese with English abstract)
- [30] 郭婧, 娄宗科, 郭启胜. 苯板保温在混凝土衬砌渠道中的应用及数值模拟[J]. *人民长江*, 2013, 44(5): 57–60.
Guo Jing, Lou zongke, Guo Qisheng. Application and numerical simulation of polystyrene insulation board in concrete lining canal [J]. *Yangtze River*, 2013, 44(5): 57–60. (in Chinese with English abstract)

Law of frost heave of canal foundation and appropriate thickness of insulation board under different groundwater levels

Guo Fuqiang^{1,2}, Shi Haibin^{1*}, Cheng Manjin², Gao Wenhui²

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agriculture University, Hohhot 010018, China;

2. Inner Mongolian Autonomous Region Research Institute on Hydraulic Sciences, Hohhot 010060, China)

Abstract: In order to find out the difference of canal foundation frost heave in Hetao irrigation area under different underground water levels, and to understand the influence of the changes of groundwater level on soil moisture transfer and mechanical properties of canal foundation, the test was carried out by setting up a test platform for frost heave under different underground water levels. And combined with the prototype channel, the effect of different groundwater levels on frost heave of foundation soil covered with different thickness of polystyrene board was analyzed, the distribution law of frost heave rate and section bending moment along channel slope was described, and a theoretical formula for calculating the suitable thickness of polystyrene board at different underground water levels was presented. It is found that the frost heaving of base soil decreases by 0.15 cm when the groundwater level is reduced by 1 cm. When the groundwater level is reduced by 0.5-1.0 m, the frost heave rate is reduced by 71%-83.8%. The decline of groundwater level effectively prevents or delays the increase of capillary water in soil, reduces the soil moisture of 0-30 cm soil layer, effectively prevents the migration of the water of freezing front, reduces the formation of ice interlayer in soil, and reduces the frost heaving deformation of soil. The frost heaving damage parts of the channel change with the change of the groundwater level. Through the analysis of ground temperature monitoring data, this paper puts forward the lowest temperature under the condition of laying 2-10 cm polystyrene board, fits the relation between the thickness of insulation board and the lowest temperature under the board at different underground water levels, and calculates the laying thickness of polystyrene board under different groundwater levels when the negative temperature does not exist under the board, so as to explore a relation between the suitable thickness for polystyrene board laying and groundwater depth. According to the theoretical formula, the variation rule of soil frost heave rate along the slope is proposed. When the groundwater level is lower than the bottom of the canal, the maximum frost heave of canal foundation soil is located at the foot of the slope of the canal, and the frost heave rate along the slope decreases gradually. When the groundwater level is higher than the bottom of the canal, the maximum frost heave of the slope is located at the 1/3 of the lower part of the slope, and the maximum frost heave of the slope is gradually transferred upward with the decrease of groundwater depth. When the groundwater depth is relatively shallow, the channel's maximum frost heave is located at the middle part of the channel slope. The soil water content in 0-50 cm soil depth decreases under the 2 conditions of actual decrease of groundwater level and ground elevation. And the migration amount increases with the depth. Migration rate difference is 1.75%-4.46%. The results show that the soil water transport has the consistent change rule whether the ground is raised or the groundwater level drops. This study can provide scientific basis and technical support for the research of thermal insulation and anti-expansion technology in the northern seasonal frozen soil area.

Keywords: groundwater; water levels; EPS; frost heaving theory; section bending moment; moisture migration regular