

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2020.06.013

盐环定扬水干渠冻胀原型试验观测与防治措施

王福升¹, 陆立国²

(1. 宁夏水利工程建设中心, 宁夏 银川 750001; 2. 宁夏水利科学研究院, 宁夏 银川 750021)

摘要:针对陕甘宁盐环定扬黄工程三道井干渠破坏严重问题, 布设6个冻胀观测断面, 通过气温、地温、冻深、冻胀量、基土含水率等主要指标观测, 分析了各影响因素的变化过程和变化规律, 提出渠道坡脚和渠底是冻胀变形最为严重的部位, 应重点进行防护; 基土含水率是冻胀破坏的决定性因素, 减轻渠道冻害关键在于降低基土含水率。根据试验结果, 提出三道井干渠在更新改造时采用聚苯乙烯板的保温防冻胀措施, 在冻胀破坏最为严重的坡脚部位采用20 cm厚现浇混凝土弧形坡脚+5 cm厚聚苯乙烯板, 全断面采用0.3 mm厚复合土工膜防渗以减少渗漏引起的基土含水率升高等措施, 并付诸实施, 效果显著。

关键词:季节性冻土地区; 混凝土渠道; 冻胀试验; 防冻胀措施; 盐环定扬水干渠

中图分类号:TV698.2; X143 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2020)06-0071-07

Prototype test observation and prevention measures of frost heaving in Yanhuanding Main Canal//WANG Fusheng¹, LU Ligu²(1. Ningxia Water Conservancy Engineering Construction Center, Yinchuan 750001; 2. Ningxia Water Conservancy Research Institute, Yinchuan 750021)

Abstract: Aiming at the serious damage to the Sandaojing main channel of the Shaanxi-Gansu-Ningyan Salt Ring Dingyang Yellow Project, six frost heaving observation sections are set up. Through the observation of main indicators such as air temperature, ground temperature, freezing depth, frost heave, and soil moisture content, the change process and law of each influencing factors are analyzed. It is proposed that the slope toe and bottom of the canal are the most severe parts of frost heave and deformation, and protection should be emphasized. The moisture content of the foundation soil is the decisive factor of frost heave damage. The key to reducing the frost damage of the channel is to reduce the moisture content of the foundation soil. According to the test results, it is proposed that the Sandaojing main canal adopts polystyrene board thermal insulation and anti-freeze heave measures during the renewal and reconstruction, and the 20 cm thick cast-in-place concrete curved slope foot and 5 cm thick polystyrene are used at the slope foot with the most severe frost heave damage. The full section adopts 0.3 mm thick composite geomembrane to prevent seepage to reduce the high water content of the foundation soil caused by leakage, and the measures are implemented, and the effect is remarkable.

Key words: seasonally frozen ground area; concrete channel; frost heave test; frost heave measures; Yanhuanding Main Canal

陕甘宁盐环定扬黄工程是解决革命老区陕西定边、甘肃环县和宁夏盐池、同心县人畜饮水困难、发展农业灌溉、改善生态环境、改变地区贫困落后面貌而兴建的一项从黄河取水的扬水工程。三道井干渠属宁夏专用工程, 承担盐池灌区47%的输水任务^[1]。

三道井干渠设计流量2.48 m³/s, 灌溉面积2万hm²(95%为高效节水滴灌)。渠道为弧形底梯形断面, 设计水深1.23 m、流速0.78 m/s、底宽0.78 m、开口宽5.64 m、内边坡1:1.5、比降1/3000, 衬砌结构

为6 cm厚C15混凝土预制板+3 cm厚M5水泥砂浆+0.18 mm厚聚乙烯薄膜。左岸4 m宽渠堤兼作渠道巡回路, 右岸渠堤宽2 m。干渠投入运行多年后, 衬砌渠道出现板缝开裂、混凝土酥松、土体膨胀、隆起架空、板面滑塌等现象, 已失去防渗固坡作用, 使得输水能力减少20%。为了查清破坏原因, 对渠道周边的基土和地下水取样化验, 结果显示, 土体母质中含有大量的硫酸盐和氯化物, 地下水中盐分含量也较高, 渠道渗漏和地下水补给使得有害物质溶解

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划(2018BBF02022)

作者简介: 王福升(1965—), 男, 高级工程师, 主要从事水利工程建设与管理研究。E-mail: jszxwfs@163.com

通信作者: 陆立国(1967—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事水工结构研究。E-mail: nxskslg@126.com

于水后直接入侵混凝土板,造成混凝土强度降低^[2]。进一步分析,除有害离子对混凝土产生腐蚀破坏外,冻胀是引起混凝土预制板隆起架空的主要原因。三道井衬砌渠道破坏现状见图1。为了掌握冻胀破坏程度,提出更新改造措施,选取2 km渠道作为试验段,开展冻胀试验观测。



图1 衬砌渠道破坏现状

水利工程中的冻土与冻害防治研究始于20世纪50年代末,发展于80年代。为解决渠道防渗抗冻问题,国家成立了“渠道防渗抗冻协会”和“全国渠道防渗科技情报网”,并在各地投入资金开展渠道防渗抗冻研究。经过几年的研究与实践,基本搞清了冻胀破坏机理,并于1991年制定了《渠道防渗工程技术规范》和《渠系工程抗冻胀设计规范》,在后续应用中逐步进行了修订完善。同时采用了“允许一定冻胀位移量”的工程设计标准,提出了“以适应、削减或消除基土冻胀为主,以经济实用的加强结构为辅”的防冻害原则和技术措施^[3-4]。多年来,北方各省针对水利工程冻害问题一直不间断地开展研究工作。

宁夏渠道防冻胀研究主要始于20世纪90年代,在借鉴国内外防冻胀衬砌模式和考虑本地实际基础上,开展了防渗防冻胀衬砌试验。防渗层先后采用0.1 mm厚土工膜、0.3 mm厚土工膜、0.3 mm厚土工膜+150 g土工布;防冻胀措施为换填砂砾料、布设排水管、铺设聚苯乙烯保温板。但由于没有完全消除基土冻胀,许多衬砌工程仍存在冻胀裂缝和冻胀位移现象,严重威胁着工程安全和防渗效果。因此,开展系统的、多种型式的防冻胀试验,找出防冻胀效果好、经济适用的衬砌结构就变得十分迫切。

1 试验观测内容和设备布设

1.1 气温、地温和冻深观测

采用CAWS100自动气象站,记录每天各时刻的气温,日最高、最低和平均气温。

埋设地温探头,采用XMT-J系列梯温仪测试0、7.5 cm、15 cm、30 cm、60 cm、90 cm、120 cm、150 cm深度土壤温度,每3天观测一次,观测时间为上午9时开始^[5]。

采用LQX-DT冻土器,垂直于混凝土板面钻孔将冻土器外管埋入于基土中,管口与混凝土板齐平,将内管的橡胶管内注满当地地下水,拧紧螺丝^[6]。内管上部缠绕胶布使得杆件与外管紧密结合,以防止外部空气进入产生影响。冻深每3天观测一次,观测时间为上午9时开始。

1.2 冻胀量观测

采用固定锚杆牵拉钢丝的方式^[7],每3天观测一次冻胀量。沿渠道坡面垂直埋设测试锚杆,埋设混凝土板下深度105 cm,板上外露20 cm。锚杆的制作方法为:选取长120 cm、外直径30 mm的六角钢,将一端预制到150 cm×150 cm×250 cm(长×宽×高)的混凝土中,六角钢另一端距离2 cm处打一直径3 mm的圆孔,用于穿牵拉钢丝,如图2所示。

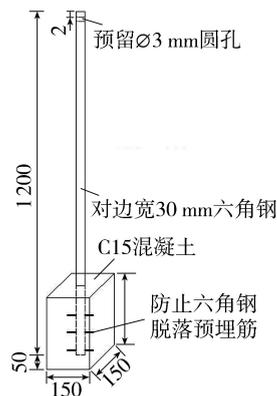


图2 冻胀量观测锚杆示意图(单位:mm)

冬季观测时,在渠坡上部锚杆2 cm圆孔处,穿细钢丝固定,另一端通过牵拉弹簧与渠坡下部锚杆相连,弹簧的作用是为防止牵拉的钢丝受冷崩断。最后分别在钢丝和混凝土板观测点位置做上标记(钢丝与混凝土板上的观测点的连线与板面垂直),每次用精度1 mm的钢板尺量测两点之间的垂直距离,即为各观测点混凝土的冻胀量,如图3所示。

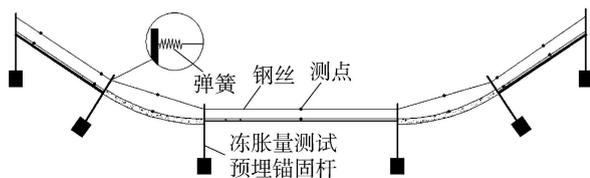


图3 冻胀量观测示意图

1.3 基土含水率观测

采用TREM(德国进口)设备,对混凝土板下0、20 cm、40 cm、60 cm深度土层的基土含水率进行测试,垂直于混凝土板坡面钻孔安装长80 cm的TRIME管,每月观测1次。

1.4 观测断面和测点布设

在2 km观测试验段中,布设了6个观测断面,每一断面布设5个测点,测点1、2位于渠道北坡的

上、下部位,测点3位于渠底中部,测点4、5位于渠道南坡的下、上部位。

试验观测段地温、冻深、冻胀量、土壤水分测点位置布置见图4。

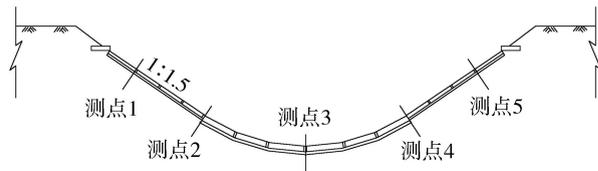


图4 地温、冻深、冻胀量、土壤水分测点位置布置

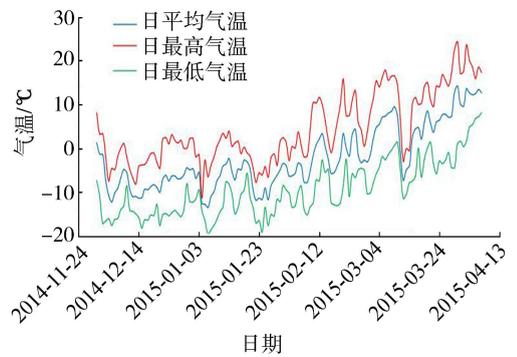


图5 日最低、最高和平均气温变化过程

2 试验结果分析

试验段冻胀观测在渠道冬灌停水后开始,具体时间为2014年11月至2015年4月,当各测点冻深为零时观测结束,历时一个冻融周期。

2.1 气温

自2014年11月19日出现负温,到2015年3月30日负温消失,总计135 d。其中,最低气温在2014年12月至2015年1月,2015年1月9日是整个冻融期气温最低,为 -16.3°C ;3月21日气温最高,为 24.6°C ;日平均最低气温 -11.7°C 。在135 d的观测期,负温81 d,占60%,由于冬季气温低,历时长,给渠道基土冻胀造成了有利的先决条件。日最低、最高、平均气温变化曲线见图5。

2.2 地温

观测混凝土预制板下深度分别为0、7.5 cm、15 cm、30 cm、60 cm、90 cm、120 cm和150 cm土壤的温度,试验段各观测断面最低平均地温和最低地温值见

表1。由表1可知:①混凝土板下近100 cm范围内最低地温均在 0°C 以下,土体内的水分结冰造成基土体积膨胀,势必对渠道表面的混凝土板产生冻胀破坏;②地温的表现特征为随着土体深度的增加而逐渐上升,土体大约在深度90 cm位置最低平均地温接近 0°C ,说明该地区的冻土深度不超过90 cm,采用内插法计算得冻土深度约为84 cm;③观测到日平均最低气温为 -11.7°C ,基土15 cm处的最低平均地温最大为 -7.8°C ,土体表层的温度与气温相差较大,说明土体具有一定的保温性;④从日观测的结果看,地温受气温直接影响,地温变化比气温相对滞后2~3 d。

2.3 冻深

盐环定灌区为季节性冻土区,根据多年气象资料,一般从11月初开始地温出现负温,此时冻土开始出现,直至来年3月下旬,土层逐渐消融^[8]。

三道井干渠冬灌停水时间为每年11月15日,设备安装完毕就出现冻土,最大冻深值出现在2015年1月,随着气温的回升,由表层和底层分别开始向

表1 试验段各观测断面测点不同深度地温观测结果

$^{\circ}\text{C}$

断面	测点	深度 15 cm		深度 30 cm		深度 60 cm		深度 90 cm		深度 120 cm		深度 150 cm	
		最低平均	最低	最低平均	最低	最低平均	最低	最低平均	最低	最低平均	最低	最低平均	最低
断面1	测点1	-7.7	-15.1	-5.0	-10.3	-2.2	-5.0	-0.5	-3.7	1.3	-2.7	2.8	-1.3
	测点2	-7.8	-16.2	-4.2	-10.3	-1.2	-4.2	1.0	-1.6	2.9	0.6	6.8	1.8
	测点3	-6.9	-14.9	-4.3	-11.1	-1.3	-5.3	0.9	-1.1	2.8	0.6	4.4	1.8
断面2	测点1	-7.2	-14.1	-4.7	-9.7	-2.2	-5.0	-0.5	-2.5	1.0	-0.4	2.4	0.4
	测点2	-7.6	-15.6	-4.6	-9.8	-1.5	-4.2	0.4	-1.8	2.3	0.4	3.6	1.3
	测点3	-7.5	-15.2	-5.2	-10.1	-2.3	-4.7	-0.1	-1.8	1.9	0.7	3.4	1.8
断面3	测点1	-6.9	-13.8	-4.3	-9.1	-1.4	-2.9	0.7	-1.3	2.5	0.1	3.9	1.4
	测点2	-7.7	-14.2	-3.6	-7.5	-0.9	-2.4	1.1	-0.9	3.0	0.7	4.5	1.9
	测点3	-6.7	-13.7	-4.5	-10.2	-0.8	-2.8	1.3	-1.6	3.2	-0.1	4.7	1.6
断面4	测点1	-6.2	-11.2	-3.8	-6.4	-1.4	-2.7	0.6	-0.9	2.1	0.7	3.4	1.8
	测点2	-6.8	-12.9	-4.0	-6.5	-1.2	-2.5	0.7	-0.7	2.5	0.8	4.0	1.9
	测点3	-7.0	-14.2	-5.0	-10.3	-1.7	-4.4	0.3	-3.0	2.3	-0.4	3.8	1.3
断面5	测点1	-6.7	-14.2	-4.5	-10.2	-2.0	-5.2	0.0	-2.6	1.8	-1.6	3.5	-1.0
	测点2	-7.0	-14.3	-3.5	-8.1	-1.3	-3.4	0.5	-2.1	2.3	-0.9	3.7	0.4
	测点3	-6.7	-14.6	-4.7	-12.0	-1.9	-6.0	0.4	-1.8	2.5	-0.3	4.1	1.3
断面6	测点1	-5.8	-10.7	-4.1	-7.0	-1.1	-3.3	0.2	-1.2	1.7	0.4	3.0	1.3
	测点2	-5.5	-10.4	-3.6	-7.0	-1.1	-3.0	0.9	-0.4	2.2	0.8	3.8	1.9
	测点3	-6.0	-11.4	-4.8	-9.0	-2.2	-4.9	0.4	-1.0	2.2	0.9	3.7	2.1

中间融化,至3月下旬,基土全部融化,冻深为零。试验段各观测断面最大冻深见表2,各测点冻深变化过程见图6。

表2 渠道各衬砌断面最大冻深 cm

位置	测点1	测点2	测点3	测点4	测点5	断面平均
断面1	62	61	71	85	96	75
断面2	63	56	73	93	101	77
断面3	50	46	67	71	94	65
断面4	41	39	56	68	84	57
断面5	63	47	24	51	82	53
断面6	57	59	27	56	76	55
渠段平均	56	52	53	71	88	

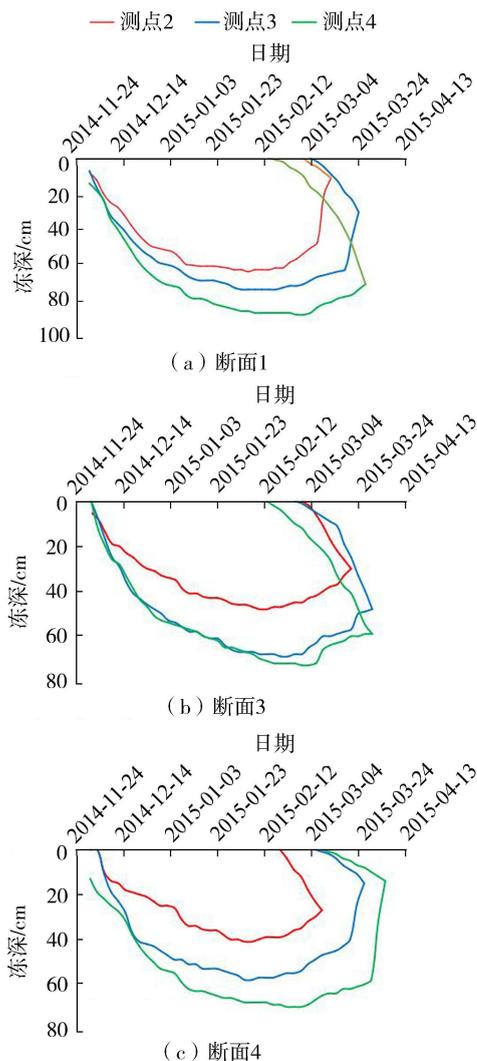


图6 不同断面测点2、3、4冻深变化过程线

从表2和图6可知:①测点1~5平均最大冻深分别为56 cm、52 cm、53 cm、71 cm和88 cm。渠道走向为东偏北15°,北坡为阳坡,南坡为阴坡,北坡的冻深小于南坡;测点5位于渠道阴坡上部,冻深值大的原因是受渠道顶和坡面两个方向的冻结,同时受渠顶树荫影响。②由于各测点的冻深普遍较大,60~100 cm深度范围的土体因冻胀引起的体积增大较多,渠道衬砌的混凝土板无法抵御巨大的土体冻

胀而隆起,日积月累,使得衬砌渠道滑塌破坏。

2.4 冻胀量

冻胀量是渠道衬砌体沿法向方向的垂直距离,与渠道冻胀破坏程度成正比,冻胀量越大,渠道破坏越严重。2014—2015年试验段各断面最大冻胀量观测值见表3,各测点冻胀量变化过程曲线比较见图7。

表3 渠道各观测断面最大冻胀量 cm

位置	测点1	测点2	测点3	测点4	测点5	断面平均
断面1	1.2	2.8	6.1	5.5	3.9	3.9
断面2	3.0	2.9	5.9	5.8	4.3	4.4
断面3	4.2	4.4	7.1	4.4	3.2	4.7
断面4	2.2	5.0	5.1	4.8	3.7	4.2
断面5	2.3	5.4	3.9	3.9	2.5	3.6
断面6	4.2	6.6	8.1	7.0	2.6	5.7
渠段平均	2.9	4.5	6.0	5.2	3.4	

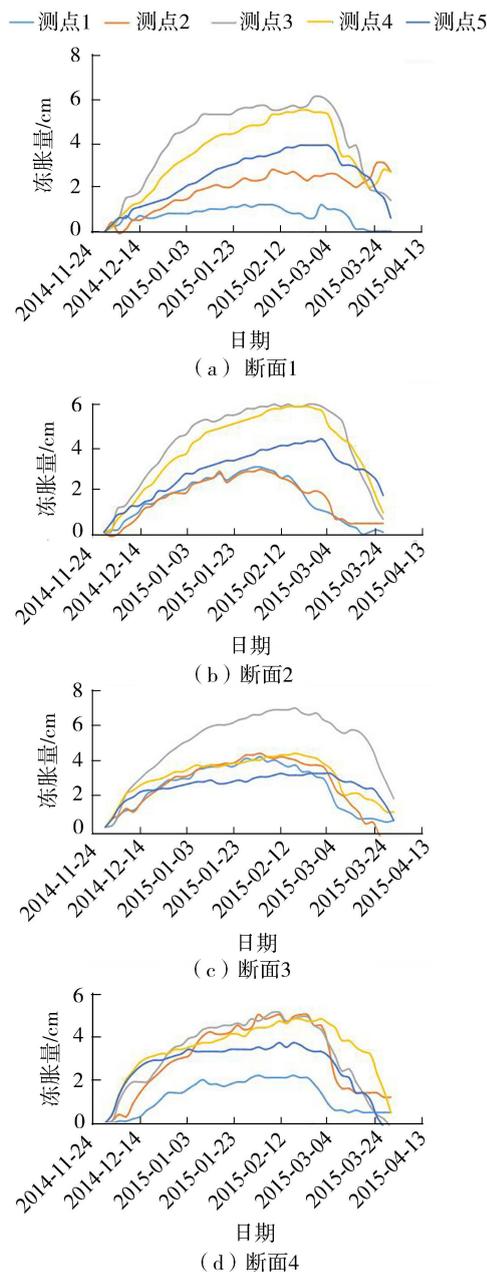


图7 不同断面5个测点冻胀量变化过程线

a. 各观测断面中,渠底测点 3 的平均最大冻胀量为 6.2 cm,大于其他各测点,若渠道无积水,渠底冻胀最大。测点 2 和测点 4 位于渠道坡脚,其平均最大冻胀量分别为 4.7 cm 和 5.4 cm,冻胀量也较大,由此也说明了渠道坡脚也是冻胀变形较大的部位^[9]。

b. 各观测断面中,各测点冻胀量普遍较大,断面 6 渠底最大冻胀量达 8.1 cm,断面 6 阴坡的最大冻胀量达 7.0 cm,现场观测该渠段的冻胀较为严重,如此大的冻胀量对混凝土衬砌渠道的破坏显而易见。

c. 各部位的冻胀量与冻深规律基本一致,阴坡的冻胀量大于阳坡,坡脚的大于坡顶。

2.5 基土含水率

渠道基土含水率大小对衬砌工程的破坏起决定性作用。若含水率超过该土的起始冻胀含水率时,在负温作用下即会产生冻胀。三道井干渠基土为砂壤土,由于渠道渗漏使得基土含水量接近饱和,渠道冬灌停水时日平均气温已降低到 0℃ 以下,基土内的水分还不能充分下渗迁移时,基土表层已开始产生冻结。随着地温降低,冻深增大,冻胀加剧。试验

观测结果见表 4。

a. 试验渠段各测点平均起始含水率超过 25%,远远超过了砂壤土起始冻胀含水率 12%~14%^[10],如此高的含水率是造成冻胀加剧的主要原因。

b. 在各观测断面中,20~40 cm 土层冻结初期的平均含水率为 25.13%,冻结期的平均含水率为 26.17%,土壤含水率增加了 4.14%;40~60 cm 土层冻结初期的平均含水率为 25.24%,冻结期的平均含水率为 26.67%,土壤含水率增加了 5.67%。说明了土壤在冻结过程中水分向冰层面迁移,使得含水率增大,导致冻胀加剧。

c. 随着地温升高,基土开始融化,20~40 cm 土层冻结期的平均含水率为 26.17%,冻结后期的平均含水率为 23.92%,土壤含水率减少了 8.60%;40~60 cm 土层冻结期的平均含水率为 26.67%,冻结后期的平均含水率为 25.52%,土壤含水率减少了 4.31%。说明冻结期到冻结后期的土壤含水率随着地温的升高呈减小趋势,同时上层土壤水分渗透比下层快。

表 4 冻结前后土壤含水率统计

%

位置	测点	深度 20~40 cm			深度 40~60 cm		
		冻结初期	冻结期	冻结后期	冻结初期	冻结期	冻结后期
断面 1	测点 1	23.32	27.91	15.80	24.53	26.26	23.82
	测点 2	26.50	26.62	26.04	26.64	24.41	22.68
	测点 3	24.78	23.73	21.32	26.97	31.58	24.85
	测点 4	25.40	26.65	22.14	25.37	27.03	28.21
	测点 5	23.26	22.85	21.53	24.71	26.59	26.71
断面 2	测点 1	22.16	27.17	21.13	23.90	23.73	24.13
	测点 2	24.95	29.79	22.50	23.35	24.48	25.93
	测点 3	23.00	26.64	22.96	25.12	29.79	27.89
	测点 4	26.03	27.10	23.61	25.01	25.96	27.63
	测点 5	22.33	21.87	21.60	25.49	22.41	22.35
断面 3	测点 1	24.83	26.80	19.63	26.51	28.34	23.95
	测点 2	25.84	28.01	20.60	26.62	26.53	22.55
	测点 3	26.18	27.10	22.79	27.62	29.21	25.19
	测点 4	23.51	26.09	21.95	26.06	29.77	26.19
	测点 5	23.39	27.85	27.42	24.93	27.81	28.76
断面 4	测点 1	23.36	26.22	22.46	23.45	24.14	20.80
	测点 2	25.07	30.33	21.60	25.61	25.72	24.64
	测点 3	25.23	28.80	24.56	26.01	27.64	27.71
	测点 4	26.10	26.32	28.70	26.44	30.97	31.51
	测点 5	22.56	27.26	27.01	23.82	28.65	28.13
断面 5	测点 1	19.67	20.77	17.48	23.36	26.92	22.87
	测点 2	25.53	26.13	23.22	21.45	22.27	20.17
	测点 3	29.01	24.67	27.50	27.42	25.85	26.70
	测点 4	28.52	21.77	34.14	26.28	24.60	25.75
	测点 5	26.92	26.43	27.26	24.48	28.55	28.65
断面 6	测点 1	20.60	23.96	21.71	25.71	27.47	24.23
	测点 2	28.01	27.78	25.28	24.83	25.45	22.86
	测点 3	29.57	25.32	27.55	29.80	28.39	28.05
	测点 4	30.11	27.44	31.15	28.04	26.89	27.91
	测点 5	28.13	25.65	26.90	19.07	22.93	24.75
渠段平均		25.13	26.17	23.92	25.24	26.67	25.52

由此说明,基土含水率大小对衬砌渠道的破坏起关键性作用,减轻渠道冻胀破坏在于降低基土含水率^[11-12]。

3 推荐的衬砌形式

盐环定三道井扬水干渠地处气候寒冷,渠道渗漏和田间灌溉使得冬灌结束后基土含水率高,冻胀是引起渠道破坏的重要原因。因此,在渠道更新改造时必须考虑防冻胀措施,本次采用聚苯乙烯板保温措施^[13]。渠道坡脚是冻胀较为严重的部位,采用20 cm厚现浇混凝土弧形坡脚的形式^[14],并设置保温板。全断面铺设复合土工膜进行防渗^[15],减少因渗漏而引起的基土含水率升高。

具体做法是:坡脚采用20 cm厚C20现浇混凝土+5 cm厚聚苯乙烯保温板,边坡采用7 cm厚C15混凝土预制板+3 cm厚M5水泥砂浆+0.3 cm厚复合土工膜+8 cm厚聚苯乙烯保温板,渠底采用7 cm厚C15混凝土预制板+3 cm厚M5水泥砂浆+0.3 cm厚复合土工膜^[16]。推荐的衬砌结构见图8。

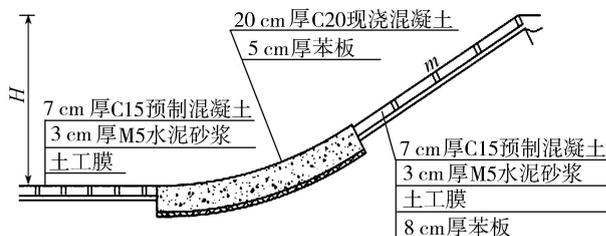


图8 渠道衬砌结构

2016年在三道井35.26 km干渠更新改造中采用了推荐的衬砌结构,经过3年多的运行,混凝土预制板坡面、现浇混凝土圆弧坡脚未出现冻胀破坏迹象,防冻胀效果显著,渠道行水安全得以保障,值得在宁夏季节性冻土地区推广应用。2016—2019年在宁夏灌区的盐环定扬水工程、惠农渠、汉延渠、东干渠、西干渠等渠道衬砌中推广应用该种衬砌结构376 km。

4 结论

a. 布设了6个冻胀观测断面,对影响渠道冻胀的气温、地温、冻深、冻胀量、基土含水率主要指标进行观测,提出冻胀是造成衬砌渠道破坏的重要原因,因此在渠道更新改造时必须考虑采用聚苯乙烯板保温防冻胀措施。

b. 通过观测成果总结得出了基土含水率高是渠道冻胀破坏的决定性因素,渠道坡脚是冻胀变形最为严重的部位。在此基础上提出了减轻冻胀的渠道衬砌加固结构形式:坡脚采用20 cm厚现浇混凝土弧形坡脚+5 cm厚聚苯乙烯板。减轻渠道破坏关键在于降低基土含水率,因此全断面采用0.3 mm厚复合土

工膜防渗,减少因渗漏而引起的基土含水率升高。

c. 在现场观测和分析总结基础上推荐的防冻胀衬砌结构对减轻冻胀破坏、延长工程寿命、保证安全运行具有综合整治效果。三道井35.26 km干渠更新改造中采用了推荐的衬砌结构,经过3年多的运行,混凝土预制板坡面、现浇混凝土圆弧坡脚未出现冻胀破坏迹象,防冻胀效果显著,渠道行水安全。

考虑到宁夏属季节性冻土地区,各灌区的气温、冻深、土壤土质、地下水位、渠道走向和挖填方状况等都存在差异,建议在今后的工程设计时要充分结合工程所在区域实际,因地制宜地进一步优化衬砌断面和防冻胀结构。

参考文献:

- [1] 陆立国,孙建军,张海晨,等.盐环定扬水干渠砌护工程破坏原因分析研究[R].银川:宁夏水利科学研究院,2015.
- [2] 张海晨.环境水对盐环定三道井干渠的侵蚀影响与防渗设计[J].节水灌溉,2013(3):45-49.(ZHANG Haichen. Influence of environmental water on erosion of Yanhuanding Sandaojing Main Canal and its seepage control design[J]. Water Saving Irrigation, 2013(3):45-49. (in Chinese))
- [3] 周维博,李立新,何武权,等.我国渠道防渗技术研究与进展[J].水利水电科技进展,2004,24(5):60-63.(ZHOU Weibo, LI Lixin, HE Wuquan, et al. Advances in canal seepage control techniques in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004, 24(5):60-63. (in Chinese))
- [4] 祁红军.黑河流域节水改造中的防冻胀措施[J].水利水电科技进展,2005,25(增刊1):143-145.(QI Hongjun. Anti-freezing measures in water saving reconstruction of Heihe River Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(Sup1):143-145. (in Chinese))
- [5] 陆立国,雍富强,洪维国,等.宁夏灌区渠道防渗防冻胀技术集成与应用研究[R].银川:宁夏水利科学研究院,2005.
- [6] 李安国,建功,曲强.渠道防渗工程技术[M].北京:中国水利水电出版社,1998.
- [7] 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,2015.
- [8] 陆立国,顾靖超,武慧芳,等.宁夏引黄自流灌区输配水关键技术研究[R].银川:宁夏水利科学研究院,2016.
- [9] 白剑.宁夏引黄灌区小型U形渠道抗冻胀试验与衬砌结构研究[D].银川:宁夏大学,2014.
- [10] 冯有亭,陆立国.膨润土防渗渠渠道衬砌防冻胀试验研究[J].水利水电技术,2016,47(12):87-92.(FENG Youting, LU Ligu. Experimental study on anti-frost-

heaving of channel lined with bentonite impervious blanket [J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2016,47(12):87-92. (in Chinese))

[11] 陆立国,周玲,王堂. 宁夏渠道衬砌防冻胀试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2008(9): 102-107. (LU Ligu, ZHOU Ling, WANG Tang. Experimental research on Ningxia channel lining step's anti-frostbite swelling [J]. Rural Water Conservancy and Hydropower in China, 2008(9):102-107. (in Chinese))

[12] 张国军. 影响衬砌渠道冻胀破坏严重的关键因素[J]. 中国农村水利水电, 2012(9): 105-108. (ZHANG Guojun. Influence of lining channel frost heaving damage serious critical factors [J]. Rural Water Conservancy and Hydropower in China, 2012(9):105-108. (in Chinese))

[13] 刘群昌,史源,吉晔,等. 聚苯板在渠道衬砌防冻胀中的应用性能评价[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(4): 1-5. (LIU Qunchang, SHI Yuan, JI Ye, et al. Application performance evaluation of rigid extruded polystyrene foam board for frost heaving prevention of channel lining [J]. Journal of Water Conservancy and

Construction Engineering, 2018, 16(4): 1-5. (in Chinese))

[14] 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 Hui Fang, WANG Hongyu, LU Ligu. Study on anit-frost effect and laying thickness of EPS board lining channels in Ningxia Irrigation Area [J]. Yellow River, 2016, 38(6):149-153. (in Chinese))

[15] 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]. 北京: 中国计划出版社, 2011.

[16] 宁夏回族自治区水利厅. 灌溉渠道衬砌工程技术规范: DB 64/T 811—2012[S]. 银川: 黄河出版传媒集团阳光出版社, 2013.

[17] 程满金, 申利刚, 步丰湖, 等. 聚苯乙烯保温板在衬砌渠道防冻胀中的应用研究[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(5): 22-27. (CHENG Manjin, SHEN Ligang, BU Fenghu, et al. Application of polystyrene insulation board used for anti-frostin channel [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(5): 22-27. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-07-18 编辑: 郑孝宇)

(上接第 65 页)

[24] 张东华, 李志娟, 刘全明, 等. 大坝变形的奇异谱分析预测[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(10): 1081-1085. (ZHANG Donghua, LI Zhijuan, LIU Quanming, et al. Singular spectrum analysis for analyzing and forecasting the dam deformation [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2019, 39(10): 1081-1085. (in Chinese))

[25] 李世友, 王奉伟, 沈云中. 大坝变形时间序列的奇异谱分析[J]. 测绘通报, 2018(9): 64-68. (LI Shiyu, WANG Fengwei, SHEN Yunzhong. Singular spectrum analysis for dam deformation time series [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(9): 64-68. (in Chinese))

[26] 袁冬阳. 基于多元时空信息挖掘的混凝土重力坝变形体征监控方法[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.

[27] 董朕, 殷豪. 基于奇异谱分析和极限学习机的风速多步预测[J]. 宁夏电力, 2020(2): 1-9. (DONG Zhen, YIN Hao. Multi-step wind speed forecasting based on singular spectrum analysis and extreme learning machine [J]. Ningxia Electric Power, 2020(2): 1-9. (in Chinese))

[28] 陈浩文, 刘文霞, 李月乔. 基于奇异谱分析与神经网络的中期负荷预测[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1333-1347. (CHEN Haowen, LIU Wenxia, LI Yueqiao. Medium-term load forecast based on singular spectrum analysis and neural network [J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1333-1347. (in Chinese))

[29] 刘怀远, 甄成刚. 基于 WOA-LSSVM 的锅炉 NO_x 排放

量预测模型[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2019, 46(4): 84-91. (LIU Huaiyuan, ZHEN Chenggang. Prediction model of boiler NO_x emission based on WOA-LSSVM [J]. Journal of North China Electric Power University, 2019, 46(4): 84-91. (in Chinese))

[30] 黄春福, 李安, 覃方君, 等. 基于 PSO-SVR 的光纤陀螺温度误差建模与实时补偿[J]. 光子学报, 2019, 48(12): 95-102. (HUANG Chunfu, LI An, QIN Fangjun, et al. Temperature error modeling and real-time compensation of fiber optic gyroscope based on PSO-SVR [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(12): 95-102. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-08-05 编辑: 雷燕)

