

甘肃友联灌区渠道防渗防冻胀技术应用

1、灌区概况

1.1 自然地理概况

1.1.1 地理位置

友联灌区位于甘肃省河西走廊高台县中部,处在祁连山和合黎山的交接平原地带,北部毗邻黑河,南靠兰新铁路复线、312国道和 G30 高速公路,东与临泽县接壤,西至许三湾沙丘及肃南县明花区。控制灌溉面积 33.49 万亩,其中农田 27.07 万亩,林草地 6.42 万亩。

1.1.2 气候条件

该灌区属大陆性温带荒漠干旱型气候,冬夏较长,春秋较短,春季多风少雨,冬季较为寒冷。多年平均气温 4.6°C ,最低气温 -22°C ,最高气温 33°C ,年平均最大风速 21m/s ,最大冻土层深 1.2m 。水库位于河西走廊平原区,多年平均降雨量 104.4mm ,多年平均蒸发量 1901.8mm ,具有干旱少雨,蒸发强烈,日照时间长,太阳辐射高,昼夜温差大和光热资源丰富等特点,适宜种植多种作物。

1.1.3 水文地质及地貌

灌区地表径流以发源于祁连山的黑河为主,灌区多年平均灌溉引水量 1.65亿 M^3 ,灌区贮存第四系松散岩类孔隙水,有潜水和承压水两种类型。含水层自南东向北西变浅。城区附近由于基

底隆起，其第四系含水层厚度不足百米。灌区潜水埋深 1~30m，承压水顶板埋深 3~15m，含水层岩性为中粗砂、亚砂土及砂砾石。表层潜水矿化度 1~2g/L，承压水矿化度小于 1g/L，属重碳酸盐型水。

灌区地貌为走廊平原区，海拔 1290~1450 米，地势自南东向北西倾斜，自南向北又可更进一步分为砾石平原、细土平原、风积沙地和河谷平原等地貌单元。

1.2 社会经济概况

高台县友联灌区辖南华、骆驼城、巷道、城关镇、宣化、黑泉 6 个乡(镇)的 83 个行政村，450 个社，57 个国营、集体和个体农林场，总人口达 11.25 万人，其中农业人口 8.78 万人。粮食作物主要有小麦、玉米，经济作物主要有蕃茄、甜菜、油料、棉花、果树、啤酒花、蔬菜等，以种植粮食作物为主。该灌区是河西走廊重要的商品粮基地，向国家提供的商品粮占高台县的 72.5%。

2009 年全灌区农业总产值达到 7.95 亿元，粮食总产量达到 4910.5 万 kg，人均产粮 436.5kg，乡镇企业总产值达到 3.56 亿元，农民人均纯收入达到 4108 元。

1.3 灌区水土资源条件及工程状况

1.3.1 土地利用状况

友联灌区土地总面积 66.57 万亩，主要由耕地、林地、荒地及荒漠戈壁等组成，现状灌溉面积已达 33.49 万亩。

1.3.2 水利工程及渠道防渗状况

友联灌区水土资源丰富，光热资源充足，是古老的灌溉农业

区，建国以来，高台县非常重视灌区基础水利设施建设，基本形成了“引、蓄、提、排”相结合，“渠、路、林、田”相配套的较为完整的灌排体系。

近年来，随着黑河流域节水改造项目的实施，灌区灌溉水的利用率明显提高，高效节水面积进一步发展，管理水平有了很大提高，水资源得到合理配置，保灌面积也有了一定的提高，灌区农业生产条件得到进一步改善。还有一部分渠道为土渠运行，大部分旧井还没有得到配套，总体上友联灌区农田水利设施配套率还很低，很大程度上制约了农村经济的发展。

友联灌区现有平原洼地水库 8 座，总库容 2357.1 万立方米；机电井 1447 眼；共有干渠 19 条，总长 324.528km，其中高标准衬砌 184.319km，衬砌率 56.8%；支渠 26 条，总长 115.691km，其中高标准衬砌 109.631km，衬砌率 94.8%；斗渠 643 条，总长 596.167km，其中高标准衬砌 383.8437km，衬砌率 64.38%。现有干、支、斗排水沟 228 条，总长度 295.74 km，配套各类建筑物 6282 座。目前，大部分排水沟因多年运行且缺乏维护资金已塌陷、淤积严重，排水不畅，建筑物老化失修。

1.4 灌区管理

灌区管理机构为友联灌区水利管理处，现有管理人员 167 人，水利管理施行灌区+农民用水者协会的管理模式，部分渠道施行水票制供水，水管体制改革步伐进行健康有序，成效明显。

2、灌区渠道防渗防冻胀技术措施应用情况

友联灌区水资源紧缺，为了节约用水，提高水的利用率，渠道防渗是灌区迫切需要解决的主要问题。但灌区地下水位，地质

条件多样化,在灌区内输水明渠渠道主要的防渗措施为刚性衬砌渠道,其他为低压管道灌溉、温室滴灌、大田滴灌和喷灌等高新节水技术,由于诸多因素的制约,高新节水技术控制面积小于明渠灌溉面积,但刚性衬砌冻胀破坏现象严重,渠道抗冻胀设计经验不很丰富。随着黑河流域灌区节水改造项目的全面实施,灌区大量的渠道进行衬砌,渠道的防渗抗冻胀技术措施成为工程建设的关键。2001 年以前,灌区内输水渠道大部分为土渠运行,渠道输水渗漏损失大,干渠水的利用系数为 83.6%,支渠水的利用系数为 86.2%,斗渠水的利用系数为 86.4%。农渠水的利用系数为 81.2%,田间水的利用系数为 89.6%,灌溉水的利用系数仅为 45.3%,截止 2009 年,随着黑河流域综合治理项目和灌区节水改造等项目的实施,对渠道采取了防渗防冻胀技术处理,渠道输水损失大大减少,灌溉效率明显提高,干渠水的利用系数提高到 85.2%,支渠水的利用系数提高到 87.9%,斗渠水的利用系数提高到 88.6%。农渠水的利用系数提高到 83.8%,田间水的利用系数提高到 90.5%,灌溉水的利用率 2009 年已经达到 50.3%,节水效益显著,灌溉运行管理效益提高。

2.1 渠道的防渗抗冻胀措施

友联灌区工程中常采取的渠道防渗措施为刚性衬砌。防冻胀技术措施主要有置换措施、保温措施、适应措施、优化结构等。

2.1.1 防渗措施

渠道防渗主要采取刚性衬砌,利用当地丰富的混凝土原料:

沙子、卵砾石和水泥。对输水渠道进行砼现浇或预制砼砖衬砌，渠道高标准衬砌以后，经灌溉及输水量测试验，渠道输水能力大幅提高，缩短输水时间，提高灌溉效率，起到防冲、减淤、防坍塌、稳定渠床及保障输水安全，减少了渠道输水渗漏损失，大大提高了渠系水的利用系数，减轻了渠道维护运行管理的投入，同期相比增加了收入，提高了渠道的质量和使用寿命。

2.1.2 置换措施

用非冻胀性土置换冻胀性土是目前最常用的抗冻胀措施，具有设计施工经验丰富，已为大家接受的优点，但渠道线长，置换工作量大，从经济上考虑，这种方法一般只适用于当地或附近有较丰富的非冻胀性土的地方，而且应保证置换层在冻结期为不饱和水和防止在使用期间不受大量的细颗粒污染。

友联灌区干、支、斗、农渠防冻胀技术措施绝大部分均采取置换措施。非冻胀性土工程上常选用含泥量小于 5% 的砂砾石垫层，若当地缺乏砂砾石而具有丰富的砂，也可考虑用粒径满足要求的砂代替砂砾石作置换层，但用砂作垫层具有施工时不宜夯实，运行期易被细颗粒污染而失效的缺点。

友联灌区采取置换措施衬砌的渠道，经多年运行，防冻胀效果非常明显。目前，除特殊地质条件外，所有衬砌的渠道均采取置换措施。但对渠道开挖高程低于地下水位的渠段，置换层在冻结期因被水浸泡而失效，置换法在这种渠段不宜采用。对受田间回归水影响的渠段置换层易被细颗粒淤塞而缩短工程寿命，应设置防滤层或土工织物对垫层料加以保护。

2.1.3 保温措施

负温是渠道产生冻胀破坏的外因，在渠道刚性衬砌体下面铺设一层受力变形小，隔热性能优良的保温材料，便可削减或消除渠床基土在冬季的冻胀变形，避免渠道的冻胀破坏。

友联灌区在渠道上使用的新型保温材料是聚苯乙烯泡沫板。聚苯乙烯泡沫保温板在工厂集中生产，质量容易控制，埋在地下不受污染，不易变质，几乎适用于任何地质条件，虽然保温板长期浸泡在水中隔热性能会减低，但此种地质条件下的渠道已具有排阴功能而无衬砌必要。同置换法相比，保温法具有施工方便，适用范围广，工程寿命长的优点，应优先选用，此外与置换法相比在非冻胀性土不丰富的地区也具有明显的经济优越性。

2.1.4 适应措施

对于地下水位较高的地段，采用柔性衬砌可避免渠道的冻胀破坏，或采用容许法向位移大的衬砌形式可减轻渠道刚性衬砌体的冻胀破坏。友联灌区主要采用的是透水衬砌方式。方法有预制异型砖衬砌法和干砌块石衬砌法两种，透水衬砌能够适应一定的变形，解决了高地下水位地区渠道冻胀破坏问题，但没解决渠道渗漏问题，不适应节水的要求，在缺水地区不应将透水衬砌当作一种新型的衬砌形式而加以推广运用。

2.1.5 优化结构

友联灌区在近年来的节水工程中，干支渠道断面大多采用弧梯形断面形式，斗农渠断面多采用U型渠槽的断面形式，与梯形断面相比，弧形断面、弧底梯形断面具有较大的容许法向位移，采用这两种断面形式有效地减轻了渠道的冻胀破坏。

2.2 技术措施的应用情况

在各种抗冻胀措施中，置换措施虽然应用最广泛，但渠道受田间回归水影响时置换层易被细颗粒淤塞而缩短工程寿命，在非冻胀性土缺乏的地区采用这种方案工程造价也相对较高。衬砌体下铺聚苯乙烯保温板是新兴的抗冻胀措施，具有适应面广、投资适中、施工方便、使用寿命长的优点，与置换法相比工程造价相当时宜，优先采用。在非冻胀性土缺乏的地区与置换法相比保温板方案在经济上也具有明显的优越性，易进行全面推广。

2.2.1 置换措施应用情况

友联灌区干、支、斗、农渠防冻胀技术措施绝大部分均采取置换措施。采取置换措施衬砌的渠道，经多年运行，防冻胀效果非常明显，应用范围很广。

2.2.2 保温措施应用情况及效果

友联灌区 2002 年在三清干渠中采用聚苯乙烯泡沫保温板衬砌渠道 1.06 公里。为了进一步推广应用，2003~2004 年我县又在友联灌区的纳凌干渠、纳凌支渠、三清干渠、柔远干渠、站家干渠、小坝干渠等渠道中推广应用聚苯乙烯泡沫保温板衬砌渠道长 32 公里，推广应用项目从 2003 年 9 月开始至 2004 年 11 月完工，共铺设聚苯乙烯泡沫保温板 32649.59 立米。保温板方案每公里投资比砂砾石垫层方案（置换措施）每公里节约投资月 13.2 万元，有效地降低了工程造价。

采用聚苯乙烯泡沫保温板衬砌的渠道，经多年运行，通过渠道上埋设的冻胀量观测杆、地温观测仪和土壤含水量观测仪，分别对渠道冻胀变形、保温板下基土温度和含水量进行定时观测，根据观测资料分析，初步得出试验结论。渠道冻胀变形量均为零，

抗冻胀效果非常明显。从外观上与垫层渠道相比，无任何变化，渠道线直面平，砌体平整，勾缝密实光滑无裂缝，工程完好，没有发生冻胀现象。

2.2.3 透水衬砌应用情况及效果

友联灌区 2003 年在站家干渠中采用透水衬砌衬砌渠道 1.8 公里。其它灌区干渠透水衬砌应用 4.9 公里。

为了定量研究透水衬砌抗冻胀变形能力，在试验段渠道上对渠道冻胀变形进行定时观测。根据观测数据分析：透水衬砌渠道受负温冻胀发生的变形量较少，所测项目对比值不大于 15 毫米，由于透水衬砌能够适应一定的变形，因此渠道衬砌体冻胀量较小，且冻胀量和回复量基本一致，没有发生严重变形现象，抗冻胀效果非常明显。

采用砼异型砖透水衬砌方案施工的渠道，通过透水的性质，将高于渠底的地下水渗入渠道输向下游，减轻或消除了地下水对衬砌体的浮托力，平衡地下水和渠道灌溉水对衬砌体压力，有利于保持衬砌渠道断面的规则性，延长渠道使用寿命。

用砼异型砖透水衬砌技术作为地下水位较高的渠道的衬砌方案，经过站家干渠的初步应用和试验，砼异型砖衬砌后，一是输水速度加快，提高了水的利用率。二是抗冻胀效果明显，衬砌体冻胀变形量在允许范围内。三是对地下水二次回归进行了有效地利用。四是发挥了排水治理盐碱地的作用。在高台县今后水利工程地下水位较高的渠道中可大量采用，能有效防止渠道冻胀破坏，降低工程造价。

3、典型渠道措施案例分析

3.1 三清干渠保温措施试验研究

我县自 2002 年 6 月份开始，主要在友联灌区三清干渠中进行聚苯乙烯泡沫保温板代替砂砾石垫层作为渠道抗冻胀措施试验研究。在三清干渠桩号 36+048~37+108 段，长 1.06 公里渠道中采用聚苯乙烯泡沫保温板代替砂砾石垫层作为渠道抗冻胀措施，并在桩号 37+048~37+108 段设置了 6 个保温板试验段（60 米），在 37+108~37+118 段设置了 1 砂砾石垫层对比试验段进行抗冻胀观测试验。从 2002 年 6 月份开始实施至 10 月份完成。

三清干渠 36+048~37+048 段，设计流量 2.5 m³/s，加大流量为 3.13 m³/s。渠道设计为弧底梯形断面，底部用 12cm 厚 C15 砼现浇，边坡用 8cm 厚 C15 砼预制块衬砌，渠深 2.96m，渠口宽度 6.03m。砌体下面铺设聚苯乙烯保温板作为渠道抗冻胀措施。

保温板密度设计为 25kg/m³，物理力学性能指标满足规范要求。由于聚苯乙烯泡沫保温板作为砼衬砌渠道抗冻胀措施在甘肃省尚属首次使用，缺乏设计与施工经验，因此设计厚度取规范推荐的上限即为设计冻深的 1 / 10。

三清干渠 36+048~37+048 段土质为重壤土，地下水位在渠底以下 2~3m，最大冻土深度 1.06m。经计算，设计冻深阴坡 144cm，渠底 135cm，阳坡 99cm；保温板设计厚度阴坡 14cm，底部 13cm，阳坡 10cm。渠道设计横断面如下所示(图 1)：

图 1：

冻深观测管 48 根。在冬季分别对渠道冻胀变形、保温板下基土温度和含水量进行定时观测，六组试验段经过三个冬季的观测，均没冻胀破坏迹象出现，冻胀变形量均为零，说明抗冻胀设计最为薄弱的第六组试验段尚有一定的安全富余。

综上所述，聚苯乙烯泡沫保温板代替砂砾石垫层是行之有效的渠道抗冻胀措施，在今后水利工程中可大量推广使用。

该项目完成后，高台县水务局积极组织申报了《渠道聚苯乙烯泡沫塑料板抗冻胀实验研究》科技项目，2004 年 9 月，张掖市科技局组织鉴定，张掖市人民政府授予市科技进步二等奖。

3.2 站家干渠透水衬砌措施试验研究

2003 年友联灌区的站家干渠等渠道工程上进行了衬砌应用。

由于站家干渠 3+160--4+960 渠段 1.8 公里，渠底基本与黑河河底相平，据渠线探抗揭示，地下水在地面以下 0.5~1.0m 之间，而渠深在地面 1.0m 以下，该段干渠经常有潜流渗入，为了开源节流，开发该段地下水，根据地下水二次回归规律，充分利用地下水，将地下水引入干渠，使有效的水资源发挥应有的效益。

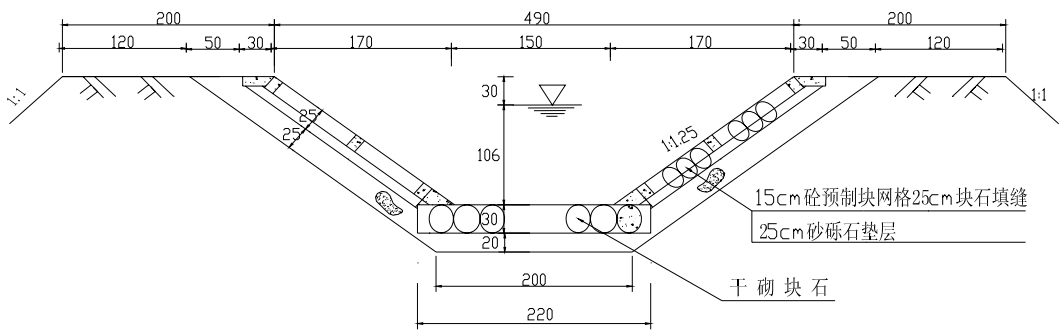
在设计工艺上将衬砌渠道砼预制砖设计为空心的正三角形和正六边形，每条边宽度 8cm，中间用块石填缝，砼预制砖和块石下面铺垫一定厚度的垫层料，用于缓解冻胀对衬砌体的变形张力。因透水衬砌的砼异型砖与干砌石之间属于柔性连接，能适应一定的变形能力，因此，能保持渠道衬砌的规则断面，提高渠系水利用率，延长渠道使用寿命。

该段渠道设计流量 1.8 m³/s，渠道设计为梯形断面，底部用 30cm 厚干砌块石，边坡用 15cm 厚 C15 砼异型砖预制块衬砌，

矽异型砖内的块石填缝厚度为 25 厘米。渠深 1.36m，渠口宽度 4.9m，底宽 1.5m。砌体下面铺设 25cm 厚砂砾石垫层。

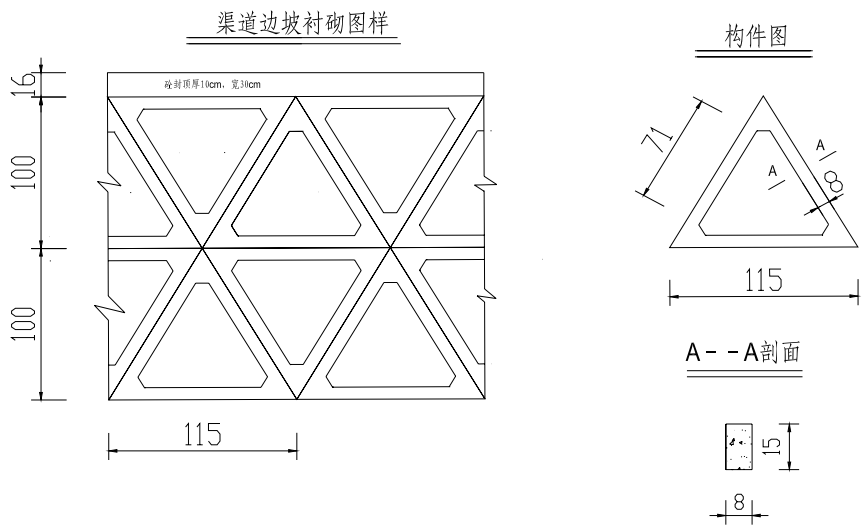
渠道设计横断面如下所示(图 2)：

图 2：

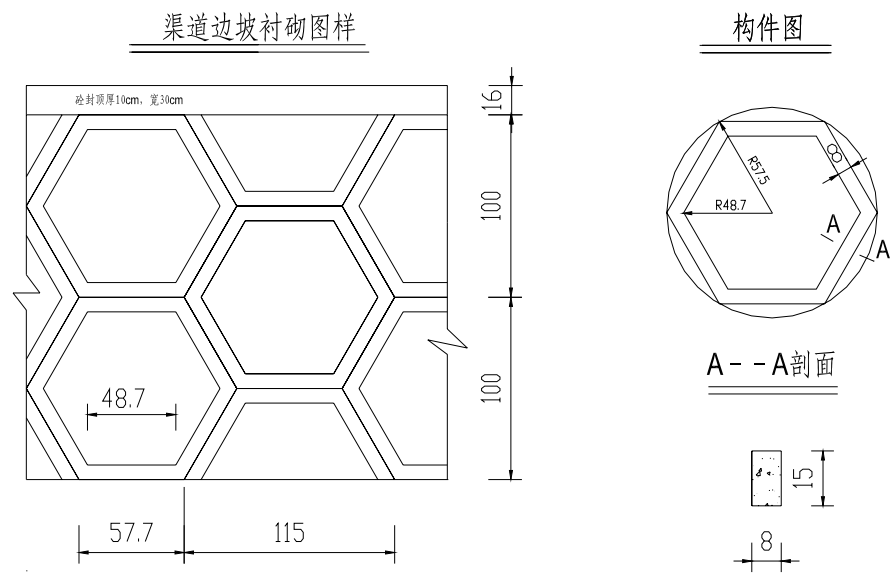


矽异型砖采用两种结构型式，一种是边长为 115 厘米的等边三角形，一种是半径为 57.5 厘米的六边形，厚度均为 15cm，经过抗冻胀设计，确定垫层厚度为 25 厘米。矽异型砖几何尺寸及衬砌图样如下：

(1) 等边三角形(图 3)



(2) 正六边形(图 4)



在透水衬砌工程实施中，设置了 6 组抗冻胀试验段和 1 组地下水回归渗流测流段，通过观测数据整理分析，透水衬砌渠道受负温冻胀发生的变形量较小，渠道经过两年的运行，所测项目对比值不大于 30mm（见表 2），渠道变形量较小，且冻胀变形量和回复量基本一致，抗冻胀效果非常明显。

表 2 砼异型砖衬砌渠道变形量观测记录表

测点位置	第 1 实验段	第 2 实验段	第 3 实验段	第 4 实验段	第 5 实验段	第 6 实验段
1 号测点距渠顶处位移	22	19	20	19	10	22
1 号测点处位移	-8	5	-7	10	-13	-9
1—2 号测点处位移	15	26	25	25	21	30
2 号测点处位移	-6	-8	-6	9	-6	-8
3 号测点处位移	4	8	-12	5	-11	-10
4 号测点处位移	-7	10	-6	-6	-13	5
4—5 号测点处位移	29	19	16	25	30	19
5 号测点处位移	-6	10	-15	-10	-21	5
5 号测点距渠顶处位移	18	19	20	25	18	15

注：位移单位以 mm 计

渠道通过透水的性质，将高于渠底的地下水渗入渠道输向下游，减轻或消除了地下水对衬砌体的浮托力，平衡地下水和渠道灌溉水对衬砌体压力，有利于保持衬砌渠道断面的规则性，延长渠道使用寿命。

透水衬砌渠道受负温冻胀发生的变形量较小，适用于高水位、低温度地区渠道改建衬砌施工，具有降低工程投资，简化施工，缩短工期，节约水量，又可改善生态环境，延长渠道使用寿命等优点。但渠道防止渗漏标准低，不适应节水的要求。

综上所述，因用砫异型砖透水衬砌技术作为地下水位较高的渠道的衬砌方案，经过应用和试验，砫异型砖衬砌后，一是输水速度加快，提高了水的利用率。二是抗冻胀效果明显，衬砌体冻胀变形量在允许范围内。三是对地下水二次回归进行了有效地利用。四是发挥了排水治理盐碱地的作用。在今后水利工程地下水位较高的渠道中可大量采用，能有效防止渠道冻胀破坏，降低工程造价，具有广阔的推广应用前景

该项目完成后，高台县水务局积极组织申报了《砫异型砖透水衬砌技术试验应用》科技项目，2004 年 9 月，张掖市科技局组织鉴定，张掖市人民政府授予市科技进步一等奖。

4、防渗防冻胀技术措施应用的体会与经验

一是健全组织，加强领导。为了加大项目建设力度，确保各项指标任务的全面完成，成立了由水务局和设计队、水管所负责同志为成员的项目建设领导小组，具体负责项目的资金筹措，协调解决项目建设中出现的问题，督促检查项目的实施进度及质量，由设计队和灌区水管所有关技术专家组成的技术小组，具体

负责项目设计、项目实施、项目观测等工作，明确责任、各负其责，为项目实施提供了可靠的组织和技术保证。

二是强化管理，落实“四制”。按照水利工程基本建设程序，配备专职项目管理人员，具体抓资金到位、关系协调、质量监督检查等工作。工程建设过程中，严格控制分包，防止层层剥皮，工程建设实行建设监理制和质量责任终身制。切实搞好工程质量管理，协调好外部各方面、各部门之间的关系，发挥异体监督作用，真正建立起约束机制，确保项目工程质量。

三是优化设计，科学论证。工程项目一开始就进行多方案优化、论证、比较，从渠道断面型式、水力条件、抗冻胀性能、工程造价等方面综合分析，最终确定施工方便，进度快，工程造价低，具有较好的抗冻胀能力的施工方案。

四是合理安排，优化施工。主体工程的施工根据各渠道的特点，利用灌溉间歇期采取分段分期施工的方法，施工方式上采用人工和机械相结合的灵活方式，以加快进度，提高施工质量。

五是加强技术培训，项目工程是一项技术性很强的水利建设工程，要管好、用好并试验推广，必须有一支会规划设计，能施工安装，懂运行管理的技术队伍，从项目工程一开始，我们就抽调部分管理人员参与工程建设全过程，从规划设计、施工安装到通水运行，并且组织学习规范及观测设施的操作规程、管理养护等方面的知识，使工程建成后，能管理，会操作，为今后推广应用新技术、新材料、新工艺积累数据。

5、建议

渠道抗冻胀问题在高地下水位地区是一个较为突出的技术

难题，措施采取的正确与否直接决定着渠道的造价和工程寿命。造成渠道冻胀破坏的因素很多，可采取的抗冻胀措施也较多，应因地制宜，结合各地区的地质条件、资源条件、经济条件，在各种抗冻胀措施中，选择投资适中、施工方便、使用寿命长的结构型式及技术措施。