
不同类型区典型工程渠道防渗防冻胀技术 应用模式及效果评价报告

中国灌溉排水发展中心

二〇一〇年十二月

目 录

1 我国渠道防渗防冻胀技术发展概况	- 1 -
1.1 渠道防渗防冻胀技术发展情况	- 1 -
1.2 防冻胀结构形式	- 3 -
1.2.1 混凝土 U 形防渗渠道	- 3 -
1.2.2 复合材料防渗结构形式	- 3 -
1.3 防渗、防冻胀新材料与新技术	- 4 -
1.4 渠道防渗工程经济分析和质量监管	- 7 -
2 渠道防渗防冻胀主要技术措施	- 8 -
2.1 渠道防渗工程的冻害类型及破坏形式	- 8 -
2.1.1 冻害类型	- 8 -
2.1.2 冻害破坏形式	- 9 -
2.2 渠道防渗工程冻胀破坏成因及特征	- 15 -
2.2.1 冻胀破坏成因	- 15 -
2.2.2 渠基土的冻胀特征	- 17 -
2.3 渠道防渗防冻胀主要技术措施	- 19 -
2.3.1 回避措施	- 19 -
2.3.2 削减措施	- 20 -
2.3.3 结构措施	- 21 -
2.3.4 管理措施	- 21 -
3 不同类型区典型工程渠道防渗防冻胀技术应用及效果评价	- 22 -
3.1 渠道防渗防冻胀类型区划分	- 22 -
3.2 不同类型区典型工程渠道防渗防冻胀措施及效果评价	- 24 -

3.2.1 西北地区	- 24 -
3.2.1.1 新疆兵团北屯灌区	- 24 -
3.2.1.2 新疆呼图壁河灌区	- 29 -
3.2.1.3 新疆三屯河灌区	- 32 -
3.2.1.4 甘肃景电灌区	- 39 -
3.2.1.5 甘肃友联灌区	- 44 -
3.2.2 东北地区	- 48 -
3.2.2.1 黑龙江音河灌区	- 48 -
3.2.2.2 黑龙江引汤灌区	- 52 -
3.2.2.3 黑龙江江东灌区	- 57 -
3.2.2.4 黑龙江悦来灌区	- 59 -
3.2.2.5 黑龙江龙头桥灌区	- 60 -
3.2.3 华北地区	- 62 -
3.2.3.1 内蒙古河套灌区	- 62 -
3.2.3.2 河北石津灌区	- 78 -
3.2.3.3 山东簸箕李灌区	- 85 -
4 渠道防渗防冻胀技术应用模式	- 88 -
4.1 置换措施应用模式	- 89 -
4.2 保温措施应用模式	- 89 -
4.3 排水措施应用模式	- 90 -
4.4 适应冻胀变形断面形式应用模式	- 92 -
4.5 复合防渗防冻胀技术应用模式	- 92 -
5 结论及建议	- 95 -
5.1 结论	- 95 -
5.2 建议	- 95 -

在我国北方寒冷地区，由于负温的作用，已建的渠道衬砌与防渗工程都不同程度遭受到冻胀破坏，不仅影响了工程的正常运行，增加了工程管理维修的难度和费用，也影响了防渗效果，有的甚至完全失去了防渗的作用。其主要原因是没有充分认识渠基土的冻胀规律，多数渠道衬砌与防渗工程规划设计时，没有充分考虑负温作用下基土特有的物理力学性质以及渠道冬季运行的特点。因此，在新建或改建渠道衬砌与防渗工程设计时，必须根据工程所在地的具体情况，采取必要的冻害防治措施，减轻或避免冻害破坏，提高其抗冻胀性能，延长工程的使用寿命，充分发挥渠道衬砌与防渗工程的效益。

1 我国渠道防渗防冻胀技术发展概况

1.1 渠道防渗防冻胀技术发展情况

灌溉渠道是灌区工程的主要组成部分，是把灌溉水输送调配到田间的不可缺少的工程设施，具有渠线长、占地多、工程量大、管护维修任务重的特点，在灌区新建和续建配套技术改造中占有十分重要的地位。渠道防渗衬砌工程投资约占目前各地灌区续建配套技术改造总投资的 2/3 左右。据不完全统计，自 1998 年实施大型灌区续建配套节水改造以来，累计衬砌大型灌区干、支渠道达 0.53 万 km，配套改造建筑物约 3.8 万座，与田间工程等其他节水综合措施配套，年节水约为 110 亿 m^3 ，节水效果显著。目前，我国灌溉渠道总长约 300 万 km，其中 80% 为土质渠道，土渠输水的渗漏惊人，约占水量的一半。已防渗衬砌的渠道只有 1/5 左右。大量宝贵的灌溉水源在输水过程中渗漏损失，十分可惜。采用渠道防渗、衬砌技术措施，可以大幅度提高渠系水的利用系数。如陕西省宝鸡峡灌区总干渠，采用混凝土防渗衬砌措施后，每年减少渗漏水量约为 2.4 亿 ~ 2.9 亿 m^3 。内蒙古河套灌区，渠系水利用系数现为 0.42，以年引黄河水量 52 亿 m^3 计，大约有近 30 亿 m^3 的水在渠道输水过程中渗漏损失掉，不仅如此，还导致地下水位抬高，土壤盐碱化程度加重。该灌区续建配套与节水改造规划，拟采用渠道防渗衬砌和田间节水等综合措施，预计项目完成后，可使渠系水利用系数提高到 0.66，综合节水效果约为 12 亿 m^3 ，同时还能控制灌区土壤盐碱化的发展。再如河北省石津灌区，已完成 181 条共 490km 的斗渠以上渠道防渗衬砌，实测数据显示，防渗后比防渗前减少渗漏损失 53% ~ 80%，如果按照该《灌区改造规划》实施，

渠道防渗衬砌后的渠系水利用系数将由原来的 0.424 提高到 0.72 左右,节省出来的水量,可用于石家庄市城市生活、工业以及改善环境用水。推广渠道防渗、衬砌技术,不仅可以减少水的渗漏损失,还可以提高渠道输水能力,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,以及保证输水安全等作用。对于西北内陆荒漠戈壁上纵坡和流速很大的渠道、黄河下游淤积严重的渠道、高填方易坍塌的渠道、地质条件复杂的傍山渠道,以及提高灌区现代化水平需要衬砌防渗的渠道等,都有着十分重要的作用和意义。

我国渠道衬砌与防渗常用混凝土、石料、膜料、沥青混凝土、土料和水泥土等材料作为防渗层,以达到防渗的目的。随着国民经济的发展,防渗技术不断提高,防渗新材料的应用,使我国渠道衬砌与防渗技术得到较快的发展,近年来将高分子材料应用在渠道防渗方面,尤其是高分子复合材料和复合结构研究方面取得了大量成果,成为今后研究和推广的方向。采用膜料做防渗材料,一般可减少渗漏量的 90%以上,且塑膜埋入地下后避免了紫外线和光的照射,大大延缓了老化速度,延长了使用寿命,一般使用可达 20~30 年左右。目前得到普遍推广应用的高分子聚合物防渗材料——复合土工膜,即将 PVC 压延涂敷于无纺布上,制成复合防渗膜料,有一布一膜、二布一膜等。渠道衬砌与防渗断面形式方面,我国采用的有 U 形、弧形渠底梯形和弧形坡脚梯形等新形式,这些断面形式具有防渗效果好、水流条件佳、占地少、适应冻胀变形的能力强、投资较小、寿命长等优点。U 形适宜于小型渠道,弧形渠底梯形适宜于中型渠道,弧形坡脚梯形适宜于地下水位埋深浅的大、中型渠道。在防治冻害技术方面,我国经多年研究和实践,采用“允许一定冻胀位移量”的设计标准,提出了“适应削减冻胀”的防冻害原则和技术措施,大大降低了工程造价。在施工方面,已研制开发了小型 U 形渠槽开挖机和浇筑机,大、中型 U 形渠道防渗工程施工采用喷射法混凝土施工或预制与现浇相结合的方法,但一般仍以人工施工为主,施工机械化程度较低。

在渠道防冻胀技术措施方面,国外发达国家近年来采用“抵抗”冻胀的技术措施,提高防渗材料强度,增设填换层等。我国经过多年的研究实践,提出了“允许一定冻胀位移量”的设计标准,采用“适应削减冻胀”的防冻害原则和技术措施,大大降低了工程造价。在渠道防渗施工技术方面,国外发达国家以机械化施

工为主，我国目前仍以人工施工为主，与国外差距较大，但已逐渐向半机械化和机械化施工方向发展。小型 U 形混凝土衬砌渠道，研制推广了系列的渠道开槽机械和混凝土浇筑机械，使 U 形渠道得到了大面积推广应用。

1.2 防冻胀结构形式

1.2.1 混凝土 U 形防渗渠道

混凝土 U 形防渗渠道是采用底部为半圆或弧形，上部为一定倾角的直线段的断面形式，目前我国中、小型渠道上大量推广应用。其具有防渗效果显著，比梯形渠道湿周短、流速快、裂缝少，因而输水损失小，小型 U 形混凝土渠道的渠道水利用系数可达 0.97~0.98，并且渠道水流条件好、流速快、输水输沙能力强，不易产生淤积现象。混凝土砌体下部为反拱，整体性好、抗外力和抗冻胀性能好，渠道占地少、投资小，一般占地面积仅为梯形渠道的 1/2~1/4，比梯形渠道省料 25%~30%。便于管理，混凝土 U 形渠道不易淤积，且整修堤岸、补修裂缝等维护工作量大大减少，一般较混凝土梯形渠道节省管理用工 60%~70%。在大型输水渠道上，近年来我国推广应用了弧形底梯形、弧形坡脚梯形断面渠道，取得了较好的防渗抗冻胀效果，但施工技术和施工机械尚不完善。

1.2.2 复合材料防渗结构形式

实践证明，采用单一的防渗材料很难达到理想的防渗抗冻效果和耐久性。近年来随着防渗膜料的发展，采用了复合材料防渗的结构形式，即采用柔性膜料作为防渗层，主要起防渗作用。在膜料防渗层上，再用混凝土等刚性材料或土料作保护层，保护膜料不被外力所破坏，防止老化，延长工程寿命。两种材料互相扬长避短，显示了明显的经济技术性能，是目前渠道防渗发展的趋势。具有防渗效果好，其渗漏量是现浇混凝土防渗的 1/5，是预制混凝土板防渗的 1/7。施工工期短、造价低。混凝土板和膜料均可进行工厂化生产，对旧渠改建工程，在停水期施工，工期短，不影响行水。混凝土保护层可以由防渗用的 10~14cm 减薄至 4~8cm，从而降低了工程造价。抗冻胀性能好，膜料防渗层可以保温，且防渗漏性能好，降低了渠基土的水分，从而减轻冻胀破坏。

1.3 防渗、防冻胀新材料与新技术

(1) 聚苯乙烯保温板防冻胀

聚苯乙烯泡沫板由可发性聚苯乙烯颗粒为原料，经加热预发泡，在模具中加热成型而制成的具有微细闭孔结构的泡沫塑料板材。具有重量轻、导热系数低、吸水率很小、化学性能稳定、抗老化性能高、耐久性好、自立性好、施工中易于搬运等优点，缺点是耐热性低，主要用于建筑墙体，起到保温隔热的作用。保温板提高基土地温显著。由于保温板保温隔热作用，可有效缓解基土与外界的热交换速度，使地基土在冻结过程中温度降低缓解，保温板愈厚表现愈明显。据试验数据统计，保温板平均每厘米厚可提高地基土温度在 1°C 左右。保温板可明显减小基土冻结深度。由于保温板导热系数低，能有效缓解冻结速率，抑制冻深发展，随着板厚增加，冻深呈线性规律减少，在试验条件下，平均每厘米厚保温板对冻深减少 10cm 左右。

保温板能够抑制基土水分变化，这是由于铺设保温板后，冻结锋面推进变缓，基土温度梯度较小，水分迁移及原驻水重新分布的能力较弱，使冻结过程中冻结锋面与地下水的距离逐渐加大，水分迁移路径相对增大，不利于水分迁移，从而减少了地基土的冻胀量。保温板对基土冻胀有明显的抑制作用。据试验结论：东面走向渠道阴坡上部铺设 3cm、4cm、5cm 厚保温板可削减冻胀 52%、97%、100%；阴坡中部铺设 5cm、8cm、10cm 保温板可削减冻胀量 39%、72%、82%。阳坡上下均铺设 3cm 厚保温板可基本消除冻胀量。南北走向渠道阴、阳坡上部铺设 4cm、下部铺设 5cm 厚保温板可基本消除冻胀量，渠底铺设 5cm 厚保温板可削减冻胀量 92.5%；渠底铺设 8cm 厚保温板可完全消除冻胀量。近年来，该项技术已在内蒙古大型灌区骨干渠道大面积推广应用，衬砌骨干渠道 267km，聚苯乙烯保温板的使用量达到 22.3 万 m^3 。提高了骨干渠道的使用寿命，达到了“防渗、抗冻、经济、可行”的目的。

(2) 膜料防渗

20 世纪 80 年代以来，高分子材料生产和应用得到飞速发展，目前已有多种类型土工合成材料可用于渠道防渗。塑料薄膜防渗性能效果好、质量轻、便于运输安装，并可适应渠床的各种变形，但存在易被外力破坏、容易老化等缺点。新疆一些灌区多年来一直推广塑料薄膜防渗技术。为了克服塑料薄膜易被刺破的

缺点,许多灌区在柔性的膜料防渗层上面铺现浇或预制混凝土板、预制 U 形渠道、浆砌石或干砌石等刚性保护材料,这种复合材料结构形式,代表了渠道防渗衬砌的发展方向。复合土工膜。它由防渗的塑料薄膜和土工织物组合而成,既可防止膜被刺破,又提高了接触面的摩擦系数。塑膜可用 PVC 或 PE 原料,土工织物由各种长丝、短丝合成纤维,经纤维成网、纤维固着、整理加工等工序加工而成。复合土工膜可根据需要复合成一布一膜、二布一膜、三布两膜等结构,目前在大型水利水电工程中已广泛应用。随着高分子材料工业的发展,复合土工膜的价格将会逐步降低,有可能更广泛地应用于渠道防渗中。

(3) 土工合成材料膨润土垫

它是在两层土工合成材料(土工织物或土工膜)之间夹封细小的膨润土颗粒,通过针刺、缝合或粘合而成的一种新型防渗土工复合材料,具有防渗性能好、抗冻融循环能力强等优点,国外有用于渠道防渗试验的工程实例,近年来国内已在垃圾填埋场底防渗处理中应用,能否在渠道防渗中应用有待进一步试验研究。

(4) 土壤固化剂

土壤固化剂是固结土壤的新型材料,它与土壤发生化学作用,改变土壤结构等性质,形成具有一定承载能力、抗渗能力和耐久性的固化土。它与水泥不同,固结对象是土壤而不是砂石料,可就地加固土壤,在工程结构中起到水泥的效用,能够节省大量的砂石料和运输费用。国外在道路、土木建筑、环境保护和水利等工程建设的基础部位有应用的实例。20 世纪 90 年代以来,国内有关单位引进消化吸收国外土壤固化剂及其技术,研制开发出国产的产品,在一些水利工程中试用。如北京玉渊潭公园湖底清淤工程,如采用现浇混凝土或预制混凝土板铺砌,施工噪声大、砂石运输量大、工序较多、工期较长,与公园旅游有矛盾。采用土壤固化剂处理湖底,克服了上述矛盾。又如作为北京市市容景观的昆玉河道整治,为防止观光游船搅翻河底淤泥,河水变浑,影响水面景观,采用土壤固化剂固化河床,也取得了较好效果。少数灌区用土壤固化剂进行小型渠道防渗衬砌试验,发现施工工艺上渠道边坡难以碾压是个问题。黑龙江省水科院选取了 5 种型号固化剂,进行抗压、抗渗、抗冻等性能室内试验。抗压强度一般可达 1MPa,最高达 10MPa,但抗冻性能差,他们认为在高寒地区目前不宜大面积推广应用。目前用土壤固化剂进行渠道防渗的工程造价,与混凝土衬砌相比,还不具有太大的

竞争力。总的来说，尚不具备大范围推广的条件。

（5）聚合物纤维混凝土

近 10 多年来，聚合物纤维混凝土已在公路、铁路、桥梁以及房建工程中应用。它具有防止或减少混凝土裂缝、提高变形能力和耐久性等优点，近年来在一些灌区渠道防渗工程中也开始试用。广西达开水库灌区总干渠填方渠段，采用聚合物纤维混凝土进行防渗衬砌试验，观测表明，抗拉强度提高 13%~27%，弹性模量降低 4%~5%，极限拉伸值提高 18%~34%，混凝土抗变形能力和抗渗能力有明显提高，防止或减少混凝土裂缝。其施工方法与普通混凝土基本相同，仅增加约 1 分钟左右的拌和时间。聚合物纤维混凝土衬砌渠道，厚度可较普通混凝土衬砌减薄 2 cm，节省的工程投资与增加的聚合物纤维费用大体相当。黑龙江香磨山灌区在斗渠上采用改性聚丙烯纤维混凝土，制作上口宽 40cm 的薄壁 U 形渠槽，纤维掺量为 1kg/m^3 ，混凝土的抗裂和抗折性能有所提高，U 形渠槽厚度减至 2cm，重量轻、更便于施工安装。接缝也用改性聚丙烯纤维混凝土进行勾缝处理，不易产生干缩裂缝，有适应冻胀变形的效果，经观测，槽体无冻胀破坏现象。河北石津灌区也进行过聚丙烯纤维混凝土室内试验和现场应用，混凝土掺入 0.9kg/m^3 聚丙烯纤维，抗裂能力提高 100%~150%，抗渗能力提高 60%，抗冲刷能力提高 50%~100%，3~28d 龄期抗压强度提高 15%~30%。施工方法与普通混凝土大体相同，切忌拆破纤维包装，造成纤维飞扬，污染环境。

（6）新型伸缩缝止水材料。

在渠道衬砌与防渗工程中，发达国家对伸缩缝止水材料较为重视，且投资所占比例较大。美国多用弹性人造橡胶、聚氯乙烯止水带作伸缩缝止水材料。日本则多采用止水板（即橡胶止水带）、沥青、沥青玛蹄脂及弹性玛蹄脂或密封胶。我国以往在止水材料方面投资较少，刚性材料衬砌渠道多用沥青砂浆、油毡、聚氯乙烯胶泥（或焦油塑料胶泥）等作伸缩缝止水材料，但有的性能差，有的造价较高和施工技术复杂，没有较好地解决生产中的问题。聚氯乙烯胶泥（或焦油塑料胶泥）中含有煤焦油，对灌溉水 and 环境都有污染。随着人们对环保要求的不断提高，这种材料被淘汰已是大势所趋。近年来，研究开发的高分子止水带、止水管和石油沥青聚氨脂接缝材料（PTN）等新型伸缩缝止水材料，止水性能好，施工方便，有待进一步实践和推广。

（7）纳米改性防渗材料

1）纳米改性混凝土防渗材料

混凝土防渗是目前广泛采用的一种渠道防渗技术措施，它具有防渗效果好，一般能减少渗漏损失的 90%~95%以上，糙率小（ $n=0.014\sim 0.017$ ），允许流速大，一般为 3~5m/s，缩小渠道断面，减少工程量和占地面积，强度高，耐久性好，便于管理和适应性广泛等优点，但其抗冻性能较差。国内外建筑业已开始利用纳米材料改进混凝土和钢筋混凝土的性能研究，并应用于高速公路路面及路缘石施工中，结果表明可显著提高混凝土的耐久性，抗冻性提高 20 倍。在渠道防渗方面。我国已开始在不显著提高成本情况下利用纳米材料改进混凝土防渗抗冻性能的研究。

2）纳米改性复合土工膜

土工膜是一种薄型、连续、柔软的防渗材料，具有防渗性能好，适应变形能力强，施工方便，工期短和造价低等优点，但是土工膜较薄，在施工、运行期易被刺穿，使得防渗能力大大降低，同时其抗冻性能差。利用纳米材料对普通塑料进行改性，生产的新型复合土工膜兼有无机、有机的特点。纳米改性复合土工膜的厚度约为普通聚乙烯土工膜的 $3/4\sim 2/3$ ，可大幅度降低工程造价，其强度和抗穿刺性能明显提高，扩大了土工膜的应用范围。

1.4 渠道防渗工程经济分析和质量监管

1998 年至今，通过国债资金、农业综合开发、地方财政补助、农民自筹资金等多种途径，用于渠道防渗衬砌的投资，估算累计达 200 多亿元。每公里防渗衬砌渠道投资，从小型渠道的几千元到上万元，中型渠道的几万元到几十万元，大型渠道约需上百万元甚至几百万元。渠道防渗衬砌是造价成本较高的永久性基础设施建设，为了加强农业抗御自然灾害的能力，改善农业生产条件，为农业结构调整和农业现代化提供物质保障，国家今后仍将会继续重视和支持灌区续建配套节水改造，还会有大量资金用于渠道工程中。如何使国家和农民有限的资金用在刀刃上，取得最佳效益，使投入产出关系合理，工程造价适中，质量可靠，使用年限长，是当前需要引起高度重视的重大课题。要尽快建立评价渠道防渗衬砌必要性、可行性和效益的方法、指标体系及量化标准，建立渠道防渗衬砌质量和维护状况的监测网络。

当前渠道防渗衬砌工程建设的质量监督控制机制很不健全，一些业主单位片面追求降低工程造价，忽视可靠性和使用寿命。有些设计施工技术人员对有关技术规范规程不熟悉，对国内外新技术、新材料发展动态不了解。国外一些灌区混凝土衬砌渠道使用年限长达四五十年，而我国不少灌区只有二三十年，甚至十几年。

2 渠道防渗防冻胀主要技术措施

2.1 渠道防渗工程的冻害类型及破坏形式

我国大部分地区属于温带气候，季节性冻土地区面积大约 513.7 万 km^2 ，占国土面积的 53.5%，分布比较广泛，在季节性冻土地区，冬季气温都要降到零度以下，负温对于混凝土衬砌防渗渠道有着一定的破坏作用，即冻害。根据负温造成各种破坏作用的性质，冻害可以分为冻胀破坏、冻融破坏和冰冻破坏三种类型，并具有不同的破坏形式。其中，混凝土衬砌防渗渠道的冻胀破坏最为严重，在我国北方季节性冻土地区比较广泛，对工程的危害程度较大，是渠道衬砌与防渗工程的主要冻害型式。

2.1.1 冻害类型

(1) 冻胀破坏

冻胀破坏指渠基土冻胀和融沉对混凝土衬砌结构的破坏。当渠基土为冻胀性土，且其含水量大于起始冻胀含水量时，在冬季负温的作用下，由于渠基土中的水冻结后体积增大，造成土体膨胀，而使衬砌结构隆起。当冻胀变形超过衬砌结构的允许变形时，或因冻胀而产生的冻胀力超过衬砌结构的抗裂或抗拉强度时，衬砌结构就会开裂，甚至折断。在春节消融时又造成渠床表土层过湿，使土体失去强度和稳定性，往往会导致衬砌体的滑塌。

(2) 冰冻破坏

冰冻破坏指冬季输水渠道水体结冰对混凝土衬砌结构的破坏。我国寒冷地区大部分灌溉渠道在最冷月停止输水，但少数兼有输水发电和向下游输水功能的渠道，在负温期间通水时，渠道里的水体常常会结冰，产生冰冻破坏。渠水完全封冻后，冰冻层逐渐加厚，对渠坡衬砌体产生冰压力，造成衬砌体的移位和破坏；

或在冰压力和渠基土冻胀力的作用下鼓胀，发生破坏变形。同时，漂浮的冰块或冰屑团会在局部积累，减少过水断面，严重时使断面完全封堵，形成冰坝，造成渠水漫溢，甚至溃渠的事故。

（3）冻融破坏

冻融破坏指混凝土衬砌材料内部孔隙水的冻融导致衬砌板的破坏。混凝土衬砌材料具有一定的吸水性，又经常处在有水的环境中，因此材料内总是含有一定的水分，这些水分在负温下冻结成冰，体积会发生膨胀，比原体积增大 9%。当这种膨胀作用引起的应力超过材料的强度时，材料就会产生裂缝，第二个负温周期中，其吸水性增大，结冰膨胀破坏的作用更为剧烈，经过多个冻融循环应力的反复作用，最终导致衬砌材料的冻融破坏，如混凝土衬砌板表层剥落、冻酥等。

2.1.2 冻害破坏形式

渠道防渗工程，在同一气候、地质及水文地质条件下，因衬砌材料和结构型式不同，其冻害的程度和破坏形式也不相同。混凝土衬砌防渗渠道应用最为普遍，冻胀破坏也最为严重。混凝土属于刚性衬砌材料，具有较高的抗压强度，但抗拉强度较低，并且衬砌板厚度较薄，适应拉伸变形或不均匀变形的能力较差。在冻胀力或热应力的作用下，容易破坏，其破坏形式归纳如下：

（1）鼓胀及裂缝

在冬季负温条件下，混凝土衬砌板与渠基土冻结成一个整体，承受着冻结力、冻胀力，以及混凝土板本身收缩产生的拉应力等，当这些应力值大于混凝土板在低温下的极限应力时，板体就发生破坏。混凝土衬砌板的冻胀裂缝，多出现在尺寸较大的现浇混凝土板顺水方向，缝位一般在渠坡坡脚以上 $1/4 \sim 3/4$ 坡长范围内和渠底中部，图 2-1 和图 2-2 为混凝土衬砌板冻胀裂缝照片；当冬季渠道积水或行水时，一般渠坡混凝土衬砌板在水位线附近出现裂缝，甚至折断；当缝间止水材料不能适应低温变形时，将在分缝处发生开裂。



图 2-1 混凝土衬砌板冻胀裂缝照片（1）



图 2-2 混凝土衬砌板冻胀裂缝照片（2）

冻胀裂缝宽度与基土的冻胀性及其不均匀程度有关。基土冻胀性弱，裂缝小；基土冻胀性强，裂缝宽，而且将发展成更严重的其他形式的破坏。温度裂缝和拉裂缝一般呈发射状，但这些裂缝往往都与土的冻胀同时发生，因而缝宽亦随之扩大，特别是其中的纵向裂缝常常成为冻胀缝。

不论上述哪种形式的裂缝，一旦出现，就难于或不可能在基土融化时完全复原。甚至由于裂缝块间相互挤顶而留下宽缝或局部挤碎。裂缝的出现，不但造成渠道漏水，而且由于泥沙通过裂缝被带入板下，污染垫层，加剧土的冻胀。在逐

年冻融循环作用下，裂缝宽度和冻胀累积发展，导致衬砌体破坏愈来愈严重。

（2）隆起架空

在地下水位较高的渠段，渠基土距地下水近，冻胀量大，而渠顶冻胀小，造成混凝土衬砌板大幅度隆起、架空。这种现象一般出现在坡脚或水面以上 0.5 ~ 1.5m 坡长处和渠底中部，有时也顺坡向上形成数个台阶状。

冬季行水渠道水位线以下的土体无冻胀，混凝土衬砌板无变位，水位线以上部分则暴露在大气中，在负温作用下，渠基土冻结膨胀，使衬砌板隆起，春季消融时很难复位，形成架空。图 2-3 为混凝土衬砌板隆起架空照片。



图 2-3 混凝土衬砌板隆起架空照片

（3）错位及滑塌

渠道混凝土衬砌板的冻融滑塌有两种形式。一是由于冻胀隆起、架空，使得坡脚支承受破坏，衬砌板垫层失去稳定平衡，因而基土融化时，上部板块顺坡向下滑移、错位、互相穿插、迭叠，其破坏形式如图 2-4 所示；二是渠坡基土冻胀隆起，融化期大面积滑坡，渠坡滑塌，导致坡脚混凝土板被推开，上部衬砌板塌落下滑，其破坏形式如图 2-5 所示。图 2-6 和图 2-7 为渠坡基土冻融滑坡导致预制混凝土板滑塌破坏照片

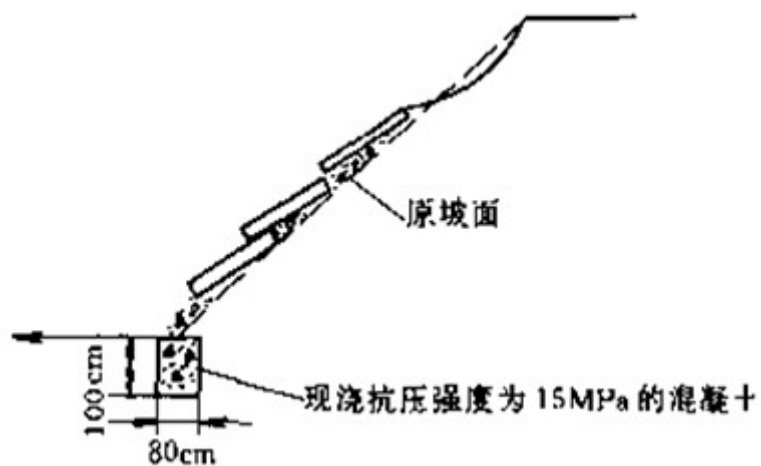


图 2-4 渠道坡脚混凝土板冻胀导致整个护坡破坏的形状

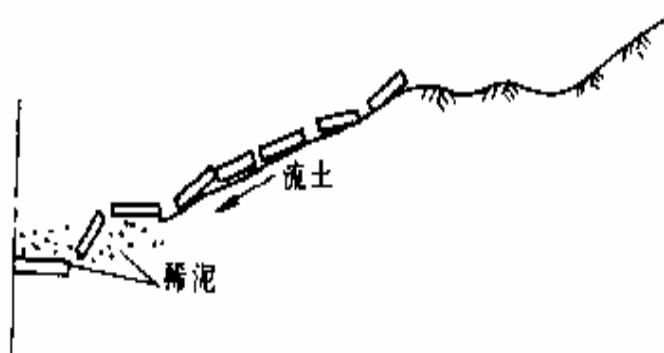


图 2-5 渠坡基土冻融滑坡导致混凝土板滑塌破坏的形状



图 2-6 渠坡基土冻融滑坡导致预制混凝土板滑塌破坏照片 (1)



图 2-7 渠坡基土冻融滑坡导致预制混凝土板滑塌破坏照片 (2)

(4) 整体上抬

当渠道断面较小，渠基土冻胀较为均匀，尤其是在弱冻胀地区和衬砌结构整体性较好时，如小型混凝土“U”形渠槽可能发生整体上抬，如图 2-7 所示；渠坡长度较短，衬砌体下没有垫层的梯形渠道，如果地下水位较深，冻胀量较小的情况下，衬砌体可能发生整体顺坡向上推移，如图 2-8 所示。

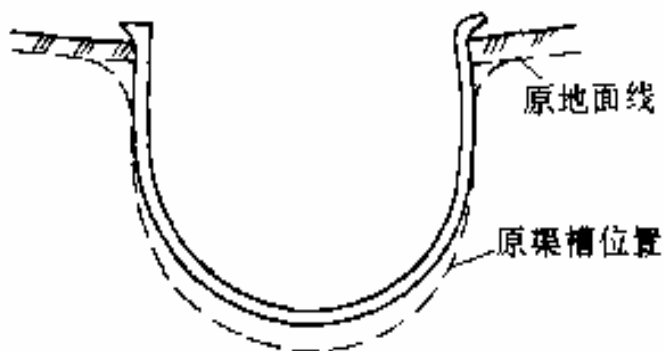


图 2-8 小型混凝土“U”型渠槽发生整体上抬情况

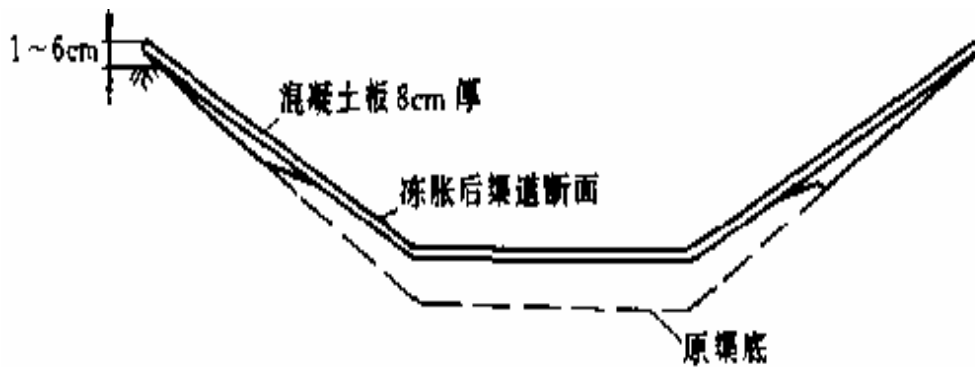


图 2-9 混凝土衬砌整体顺坡向上推移

整体上抬的渠道衬砌体，融化期亦可能由于不均匀沉陷和不能恢复原位，以及通水时水流作用导致裂缝和淘刷、错位和塌陷等破坏，在逐年反复冻融作用下，特别是在衬砌体整体性较差时，如上述后一种衬砌板整体上抬的情况下，这种破坏将变得愈加严重。

（5）剥落及酥松

混凝土在凝结硬化过程中会形成许多毛细孔隙，在冬季负温条件下，这些毛细孔隙中的水结冰产生体积膨胀，当压力超过混凝土能承受的应力时，混凝土内部就会产生微裂缝，孔隙变大。经过年复一年冻融循环，混凝土损伤不断扩大，逐步积累，混凝土中的裂缝相互贯通，强度逐渐降低，造成混凝土破坏。抗冻标号达不到要求和拌制不良的混凝土常发生这种破坏，首先是混凝土表层酥松、剥落，然后向深部发展，以至完全破坏。

另外，混凝土衬砌渠道分为现浇混凝土衬砌和预制混凝土板衬砌。预制混凝土板衬砌渠道，为了便于施工，预制板一般尺寸较小，重量轻，工程运用实践表明，这种衬砌结构型式抗冻害能力差。由于渠基土的不均匀冻胀，常使预制混凝土板在接缝处开裂或预制板本身产生裂缝；在严重冻胀条件下，出现预制混凝土板块架空、错位、下滑等现象。现浇混凝土衬砌分块较大，接缝少，渗水损失也少，抗冻害能力比预制混凝土板好，这种衬砌结构在渠基土的不均匀冻胀作用下，易产生隆起或出现不规则的裂缝，被裂缝分开的板体间多产生错位。裂缝纵横向都有，但多为纵向裂缝。

2.2 渠道防渗工程冻胀破坏成因及特征

渠基土冻胀对混凝土衬砌渠道的破坏，在我国北方季节性冻土地地区比较广泛，对工程的危害程度较大，是混凝土衬砌渠道的主要冻害型式。因此，下面主要总结和分析渠基土冻胀破坏成因及特征。

2.2.1 冻胀破坏成因

(1) 渠基土的冻胀机理

土体发生冻胀必须具备土质、水分和温度三个条件，称为土的冻胀三要素，三者缺一不可。渠基土发生冻胀也一样，即必须具备这三个条件：一是具有冻胀敏感性的土质；二是土壤含水量超过起始冻胀含水量（特别是有外来水源补给）；三是达到土体冻结的负温和一定的持续时间。因此，对于渠道衬砌与防渗工程，当采用一定措施控制其中一个条件，就可以减弱或消除渠基土的冻胀，达到防治冻害的目的。

渠基土产生冻胀是由于土体中的水分冻结成冰后体积发生膨胀的结果。在非饱和土冻结时，土体中水分（孔隙水）的体积增量将首先充填剩余空间，土体冻胀量不是很大，其冻胀危害也不大。但当土体在冻结过程中有外界水源补给时，就会发生冻结水分迁移而形成分凝层，使土体的冻胀量急剧增大，其冻胀危害也增大。

渠基土在冻结前，土体中的液相水形成以土颗粒为中心的结晶核，当土体温度达到相应的冻结温度以下时，土体中的水分冻结成冰，出现冰晶体，使土颗粒之间的凝聚力由未冻前的水膜和水的表面张力改变为土颗粒在冰晶体间的分子力作用，从而改变了原土体的物理力学性质，如抗压强度提高、压缩性显著减小、导热系数及导温系数增大等。土冻结成冰时，土体体积约增大 9%，因而发生土体胀大现象。在一定的负温作用下，水分与土颗粒表面相互作用力小于冰的结晶力，结晶的冰层吸附相邻土层的水分，冰晶体不断增长。

由于在土体冻结过程中发生连续的水分迁移，土体中水分（包括未冻区向冻结锋面迁移补给的水分及孔隙中原有的部分水分）冻结成冰，形成冰层，且称不均匀分布和分层，体积胀大，一方面使下部未冻土层受到压缩，另一方面冻结的渠床表面发生隆起，产生冻胀。

渠基土冻胀宏观上表现为冬季负温时渠床表面的不均匀升高隆起，与其相反

过程是春季融化后渠床表面融沉下降。

(2) 渠基土冻胀的主要影响因素

渠基土冻胀是水分迁移及其派生的现象,对水分迁移的影响因素也就是对冻胀的影响因素。影响水分迁移强弱的因素主要有渠床土质、土体含水量、温度条件和荷载压力。有效改变或控制这些因素之一即可达到减弱或消除渠基土冻胀的目的。

① 渠床土质

渠道冻害严重程度与渠基土的冻胀量大小有关,而冻胀量则与土的冻胀敏感性有关。土的冻胀敏感性决定于土颗粒大小、矿物成分和密度等。土颗粒愈小,其比表面积愈大,与水相互作用的能量也愈高。土颗粒的大小即比表面积的差异直接影响到土体冻结过程中水分迁移能力的不同,因而不同土颗粒组成,其冻胀特性不同。一般随着颗粒粒径减小,土的冻胀性增大。粗粒土中粒径小于 0.075mm 的土粒重量占土样总重量的 10%及以下时,为非冻胀性土;细粒土及粒径小于 0.075mm 的土粒重量超过土样总重量的 10%的粗粒土为冻胀性土。

矿物成分在土体冻结过程中对水分迁移有影响,因而对土的冻胀也有影响。土的密度对冻胀也有一定的影响,在同一含水量下,干容重不同,冻胀系数可相差很大,其变化规律,在相同条件下,冻胀系数随含水量的增大而增大。一般通过压实提高土的密度,可以减少冻结过程中的水分迁移量,从而减小土体的冻胀量。

② 土体含水量

渠基土中的水分是其产生冻胀的主要因素。不是所有含水的土冻结时都会产生冻胀,只有当土体中的水分超过某一界限值后,土的冻结才会产生冻胀,这个界限一般称为土的起始冻胀含水量。当土体含水量小于其起始冻胀含水量时,土中有足够的孔隙容纳未冻水和冰,冻结不会产生冻胀。

当无外界水源补给时,渠基土的冻胀性强弱主要取决于土体中的含水量。但当有外界水源补给时,渠基土的冻胀性不仅与起始冻胀含水量有关,而且外界水源的补给可大大增加其冻胀性。

③ 温度条件

温度条件包括外界气温、渠床土体温度、土体中的温度梯度和冻结速度等。

渠基土的冻结冻胀过程，实际上是在负气温的作用下土体中温度的变化过程。土体在达到起始冻结温度后开始冻结，然后再降温至起始冻胀温度时开始冻胀，最后达到停止冻胀温度后停止冻胀。在冻结过程中，上层土体水分含量的增加是下层土体水分在温度梯度驱动下向上层迁移造成的。冻结速度对冻胀也有影响，当冷却强度大时，冻结面迅速向未冻部分推移，未冻部分的水来不及向冻结面迁移就在原地冻结成冰，无明显冻胀；冷却强度小时，冻结面推移慢，未冻水克服沿途阻力后到分凝成冰面结冰，在外部水源补给下，冻结面向未冻部分推移越慢，形成的冰层越厚，冻胀也越大。

在无外界水源补给时，对粘土来说，自土体冻结温度至 -3°C 左右，土体冻胀剧烈，冻胀量约占最大冻胀量的 $70\sim 80\%$ ； $-3^{\circ}\text{C}\sim -7^{\circ}\text{C}$ 范围，土体冻胀增长缓慢，冻胀量约占最大冻胀量的 $15\sim 20\%$ ； $-7^{\circ}\text{C}\sim -10^{\circ}\text{C}$ 范围，土体冻胀极为缓慢，冻胀量约占最大冻胀量的 5% 左右。对于中粗砂， $0^{\circ}\text{C}\sim -1^{\circ}\text{C}$ 为冻胀剧烈阶段， $-1^{\circ}\text{C}\sim -2^{\circ}\text{C}$ 为冻胀增长缓慢阶段， $-2^{\circ}\text{C}\sim -3^{\circ}\text{C}$ 为冻胀增长极为缓慢阶段。粘土的冻胀停止温度为 $-8^{\circ}\text{C}\sim -10^{\circ}\text{C}$ ，亚粘土为 $-5^{\circ}\text{C}\sim -7^{\circ}\text{C}$ ；亚砂土为 $-3^{\circ}\text{C}\sim -5^{\circ}\text{C}$ ；砂土为 -2°C 左右。

④ 荷载压力

增加土体外部荷载可抑制一部分水分迁移，减轻冻胀。如果继续增加荷载，使其等于土粒中冰水界面产生的界面能量时，冻结锋面将不能吸附未冻土体中的水分，土体冻胀停止，此时的荷载称为中断压力。但是，在实际的渠道衬砌工程中，为防止渠基土冻胀所需要的外部荷载是很大的，因而单纯依靠外部荷载抑制冻胀是不现实的。

2.2.2 渠基土的冻胀特征

对于均质土渠道，冻胀在渠道断面上的分布一般分为四种类型：

(1) 地下水位低于渠底，但小于临界距离，渠道冬季负温期间不行水且无积水，一般为渠底冻胀量最大，渠顶最小或无冻胀量出现，渠坡由下向上逐渐减小，其冻胀变形如图 2-9 所示。当阴阳坡向明显时，阴坡冻胀量最大，渠底次之，阳坡冻胀量最小；

(2) 地下水位高于渠底，冬季渠道行水或渠底积水，由于渠水表面结冰后具有保温作用，渠底及渠坡冰冻面以下冻胀量较小或不出现冻胀，渠道两坡则由

于土体含水量较高和水分迁移的补给水源，在冰面之上一定范围内冻胀量最大。当冰面以上渠堤较高时，渠坡上部可能不会出现冻胀，冰面处的冻胀也将受冰层的限制，其冻胀变形如图 2-10 所示；

(3) 地下水位在临界距离以下时，断面上各点的冻胀量取决于土体中含水量的高低，一般只在渠底和坡下部发生轻微陈胀或无冻胀，对衬砌体的破坏作用不大；

(4) 渠顶有大量外水补给，如冬灌田间渗水、降雨或地下水位接近坡顶的穿山渠道等，这种情况下，渠坡上部冻胀量将大于下部，或上下冻胀量分布比较均匀，但此时渠底一般有一定深度的积水，故渠底冻胀量最小或不发生冻胀，其冻胀变形如图 2-10 所示。

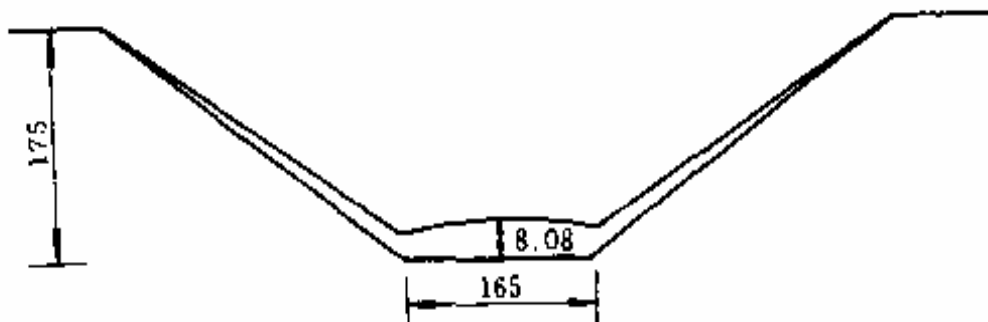


图 2-10 渠底冻胀量最大渠坡由下向上逐渐减小的冻胀变形示意图



图 2-11 渠道冰面以上渠堤较高时冰面处的冻胀受冰层限制的冻胀变形示意图



图 2-12 地下水位接近坡顶时渠坡冻胀变形示意图

渠基土发生冻胀变形后，在消融期表面又逐渐回沉。在某些情况下，冻胀变形可全部复原，甚至出现微沉陷量。但有时冻胀变形不能完全复原，而有一定的残余变形。残余变形值与最大冻胀量有关，大量观测试验资料表明，冻胀量小于 2~3cm 时，融化期末的残余变形很小或为零，不会引起渠道衬砌体的逐年累积变形而最终导致破坏。

2.3 渠道防渗防冻胀主要技术措施

混凝土衬砌渠道是否产生冻胀破坏，其破坏程度如何，主要取决于渠床的土质条件、土体含水量、负温条件及工程结构型式等因素。如果采取措施消除或改善其中一个因素，就可以减轻或防止衬砌结构的冻胀破坏。实践证明，混凝土衬砌渠道的冻胀破坏防治，应针对产生冻胀的因素，结合工程具体条件，从渠系规划布置、渠基处理、衬砌材料与结构型式、施工质量和运行管理等方面着手，全面考虑，采用适宜的防治冻害措施。

2.3.1 回避措施

回避冻胀措施是在渠道工程规划设计时，注意避开出现较大冻胀量的自然条件；或者在冻胀性土地区，采用回避冻胀的结构措施，防止冻害发生。

（1）避开较大冻胀的自然条件

①在渠道规划选线时，宜结合常规要求，尽可能避开粘土、粉质土壤、淤土地带和松软土层等地段，选择透水性较强（如砂砾石）的不易产生冻胀的地段。

②避开地下水位高（特别是有傍渗水补给）的地段，使渠底冻结层控制在地下水对冻胀的临界影响深度以上；冬季不输水渠道尽可能采用填方渠道。

③渠线尽可能布设在地形较高的脊梁地带，避免渠道两侧有地面水（降水或

灌排水)入渠;在有坡面傍渗水和地面回归水入渠的渠段,尽量做到渠、路、沟相结合,或者专设排水设施。

④沿渠道外两侧应规划布置林带,树木有排水作用,树根对土壤能起加固和垫层作用,可以改善渠床土基,如柳树根能改变渠基土壤结构,可使强冻胀性的细粒土,改变为弱冻胀性或非冻胀性的有须根的网状土,有利于防冻害。但植树距衬砌防渗结构应有一定距离。

(2) 回避冻胀的结构措施

①埋入措施。将渠道构造作成涵或管埋在冻结深度以下的措施,即采用暗渠(管)输水。采用埋入措施可以避免冻胀力、热作用力等的作用,是一种可靠的防冻胀措施,并且占地很少,水量损失最小,管理维护简单方便,便于交通和机耕。但造价较高,且需要一定的水头。

②置槽措施。将渠槽侧壁全部或部分设置于地面以上,避免侧壁与土接触以回避冻胀。一般渠槽断面为矩形,槽侧回填土高度应小于槽深的 $1/3$,并在渠槽底部设置非冻胀性土置换层。常用的有预制混凝土矩形槽、现浇混凝土矩形槽和浆砌石矩形槽。这种渠槽施工简单方便,适用于中小型填方渠道上,是一种较为经济的防治冻害措施。

③架空渠槽。用桩、墩等构筑物支撑渠槽,使槽体与基土脱离,避开冻胀性基土对渠槽的直接破坏作用。但必须保证桩、墩等不被冻拔。这种措施形似渡槽,占地少,易于适应各种地形条件,不受水头和流量大小的限制,管理维护方便,但造价较高,适用于渠基土冻胀量较大的情况。

2.3.2 削减措施

当渠基土冻胀量较大,且渠床在冻胀融沉的反复作用下,可能产生冻胀累积或残余变形情况时,可采用适宜的削减冻胀的措施,将渠基土的最大冻胀量削减到衬砌结构允许冻胀位移范围内。

①置换措施。在冻结深度内将衬砌板下的冻胀性土换成非冻胀性土。砂砾石垫层不仅本身无冻胀,而且能排除渗水和阻止下卧层水分向表层冻结区迁移,所以砂砾石垫层能有效地减少冻胀,防止冻害现象的发生。

②保温措施。在渠道衬砌体下铺设隔热保温层,阻隔大气与渠基土的热量交换,提高衬砌体下基土温度,消减或消除冻胀,防止发生冻害。保温材料宜采用

憎水性材料，常用的隔热保温材料有膨胀蛭石、膨胀珍珠岩、聚苯乙烯泡沫板、硬质聚氨酯烯泡沫板和高分子防渗保温卷材等。根据试验资料，1cm 厚的聚苯乙烯泡沫塑料保温层相当于 14cm 厚填土的保温效果。

③压实措施。采用压实措施提高渠床土密度以降低冻胀量是一种简单易行的方法。压实法可使土的干密度增加、孔隙率降低、透水性减弱，从而减小渠基土的冻胀变形。密度较高的压实土冻结时，具有阻碍水分迁移、聚集，从而削减甚至消除冻胀的能力，据此，可以通过渠床的压实处理，来达到防止冻害的目的。试验证明，当土的饱和度一定时，土的冻胀性随干密度的增加而下降。

④隔水与排水措施。采用塑料薄膜、油毡、膨润土防水毯、复合土工膜等，设置隔水层，隔断渠道渗水、大气降水和地下水等对冻结层的补给，从而削减或消除冻胀。当地下水位高于渠底，或地下水位虽不很高，但渠基土透水性差，渠道的渗漏水 and 浸入渠基的雨水不能很快渗入基层深处时，应根据渠道所处的地形和水文地质条件，按不同情况设置排水设施，以达到排泄畅通、地基疏干、冻结层无水源补给的目的。

2.3.3 结构措施

结构措施就是在设计渠道断面和衬砌结构时，采用合理的形式和尺寸，使其具有削减、适应或回避冻胀的能力。

①适应不均匀冻胀能力较优的渠道断面形式有 U 形、弧形底梯形和弧形坡脚梯形等，小型渠道宜采用 U 形断面，中型渠道宜采用弧形底梯形断面，大型渠道宜采用弧形坡脚梯形断面。

②当地下水位较深且无外水源侵入渠基时，采用混凝土板膜复合衬砌防渗结构，具有很好的防冻胀效果。

③对于大中型混凝土衬砌渠道，还可采用架空梁板式（预制 II 形板）、预制空心板式、楔形板、肋梁板以及新型连锁板衬砌结构形式等结构型式[5]，具有削减冻胀变形能力，比矩形板的抗冻胀能力强。

2.3.4 管理措施

运行管理不善会加重混凝土衬砌渠道的冻害破坏。如冬季来临时，渠道停水过迟，渠基土中水分不及时排除即开始冻结；对冻胀裂缝不及时修补，造成裂缝

年复一年地扩大、变形累积，以致破坏。因此，必须加强运行管理，做好以下管理工作。

①冬季不行水渠道，在基土冻结前停水，并在停水后及时排除渠内和两侧排水沟内的积水；

②冬季行水渠道，在负温期间宜连续行水，并保持在最底设计水位以下运行；

③每年进行一次衬砌体的裂缝修补，使砌块缝间填料保持原设计状态，衬砌体封顶保持完好，不允许有外水流入衬砌体背后；

④及时维修排水设施，保证排水通畅。

3 不同类型区典型工程渠道防渗防冻胀技术应用及效果评价

3.1 渠道防渗防冻胀类型区划分

渠道防渗防冻胀类型区划分是根据我国气候条件、土壤质地、行政区划以及渠道防渗防冻胀技术应用情况，划分为东北地区、西北地区、华北地区和其他地区四大类型区，各区的自然条件及特点如下：

（1）西北地区

西北地区包括陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区和新疆维吾尔自治区，总土地面积 309.14 万平方公里，约占全国总面积的 33%；总耕地面积 2.12 亿亩，约占全国总耕地面积的 12%。西北地区地处内陆，属干旱半干旱气候区。区内气候干旱，降水稀少，降水自东向西递减。全区多年平均降水量，除陕西为 667.8mm 外，其它省区在 270~320mm 之间。年蒸发量高达 1000~2600mm 或以上，甘肃景泰灌区年均降水量不足 200mm，年蒸发量在 3300mm 以上。因此，西北地区农业生产对灌溉的依赖程度高，许多地方没有灌溉就没有农业。西北地区地域广阔，地形复杂，高山与平原、盆地相间，沙漠与绿洲共存，夏季高温，冬季寒冷，气温的空间分布差异较大，受地形影响非常显著。年平均气温的变化在 0~16℃ 之间，1 月平均气温的变化范围在 -27~4℃ 之间。西北地区土壤主要有黑垆土、荒漠土、棕钙土等，主要种植农作物为小麦、玉米、棉花、马铃薯等。渠道防渗工程的冻胀破坏在该区比较严重。

（2）东北地区

东北地区包括黑龙江省、吉林省、辽宁省和内蒙古自治区东部地区，南起辽

宁省宽甸县境，北至黑龙江主航道中心线，长约 1300 千米；西起大兴安岭西坡阿尔山附近，东至乌苏里江与黑龙江合流点，宽约 1000 千米。总土地面积 125 万平方公里，约占全国土地总面积的 13%；总耕地面积 4.46 亿亩，约占全国总耕地面积的 25%。东北地区是我国纬度位置最高的区域，属大陆性季风型气候，春季升温快，秋季降温快，夏季温暖而短暂，冬季严寒而漫长。1 月份为最冷月，平均气温 -25 至 -29℃；7 月最热，平均气温 17-19℃。年极端最低气温为 -45℃。自东而西，降水量自 1000 毫米降至 300 毫米以下，气候上从湿润区、半湿润区过渡到半干旱区，农业上从农林区、农耕地、半农半牧区过渡到纯牧区。东北地区土壤主要有黑土、水稻土、盐碱土、白浆土等，主要种植农作物为春麦、大豆、马铃薯、玉米、甜菜、高粱，北部盛产大豆、甜菜、大米等，中部则盛产高粱、小米、棉、花生等，南部则盛产温带水果、玉米、棉花等。渠道防渗工程的冻胀破坏在该区最为严重。

（3）华北地区

华北地区包括北京市、天津市、河北省、山西省和内蒙古中西部，位于大兴安岭、青藏高原以东，内蒙古高原以南，秦岭淮河以北，东临渤海和黄海；西邻青藏高原，东濒黄、渤二海；北与东北地区、内蒙古东部地区相接。总土地面积 88.6 万平方公里，约占全国总面积的 9.5%。华北地区属亚热带和中温带的过渡带，冬季寒冷干燥，春季干旱风沙大，夏季气温高、雨量集中，秋季凉爽，光照时间长。多年平均气温 8~14℃，年最低气温多出现在 1 月份，最低可达 -35℃。多年平均降水量位 500~600mm，其分布特点是东南部多，西北部少，由东南向西北递减。该区大部分地方年蒸发量为 700~1000mm。华北地区土壤主要有褐土、褐潮土、黄潮土、盐化潮土等，主要种植农作物为小麦、玉米、谷子、棉花和花生等。渠道防渗工程在该区也存在一定的冻胀破坏。

（4）其他地区

除东北地区、西北地区和华北地区以外存在渠道防渗工程冻胀破坏的地区。

3.2 不同类型区典型工程渠道防渗防冻胀措施及效果评价

3.2.1 西北地区

3.2.1.1 新疆兵团北屯灌区

(1) 灌区概况

兵团农十师北屯灌区位于新疆阿勒泰地区福海县境内，介于北纬 $47^{\circ} 05' \sim 47^{\circ} 27'$ 、东经 $87^{\circ} 31' \sim 88^{\circ} 03'$ 之间。灌区设计灌溉面积 78 万亩，有效灌溉面积 68.25 万亩。北屯灌区所处区域属大陆性干旱气候，气候特点为干旱少雨，冬冷夏热，气温日较差大，日照丰富。农十师北屯气象站观测资料表明，多年平均气温为 3.9°C ，最热月 7 月的平均气温为 22.9°C ，最冷月 1 月的平均气温为 -18.2°C ，历年极端最高气温 39.7°C ，极端最低气温 -43.7°C ；多年平均降水量 99.5mm；多年平均蒸发量 1868.6mm；多年平均积雪厚 5~10mm；最大冻土深度 1.81m；水面最大结冰厚 1.0m；多年平均日照时数 2850 小时；多年平均无霜期 142 天；多年平均风速 3.2m/s，以西北风居多，最大风速 22.6m/s，主要灾害性气候：干旱、大风、干热风、低温、冻害、冰雹等。北屯灌区的灌溉水源为额尔齐斯河。额尔齐斯河是中国唯一注入北冰洋的外流河，在我国境内长为 546km，流域面积 5.7 万 km^2 。北屯灌区地处额尔齐斯河中上游段，河流通过北屯灌区段长度是 55km。灌区分布在额尔齐斯河二级阶地上，根据调查，灌区地下水位在灌溉季节埋深为 0.50~1.00m，冬季地下水埋深 1.5m 左右。

北屯灌区位于额尔齐斯河南岸的二级阶地上，地势东高西低，南高北低，全局看是东南向西北倾斜，地面坡降 1/200~1/700，海拔高程 500.00~560.00m，大区平坦，小区起伏，垦区的大小洼坑星罗棋布，灌区土质属于额尔齐斯河冲积物，由于长期处于剥蚀过程中，西北风不断吹走表层松散物质，造成地表组成物较粗，大多为砾质砂壤、轻壤土，耕层浅，一般为 25~45cm，以下为卵石、粗砂层，透水性强，保水、保肥能力差。

北屯灌区是新疆生产建设兵团最北部的大型灌区，对屯垦戍边具有战略作用，但灌区气候、土壤等自然条件差，灌溉用水来源单一且不稳定，这一切都要求要加强灌区水利设施的配套改造，充分发挥灌溉工程效益。

北屯灌区现已形成了以总干渠、干渠、支渠、斗渠为主，农渠、毛渠为辅的六级渠道灌溉体系，目前灌区内的总干渠、干渠（冬季运行的除外）多数已做了

防渗改造，部分支渠、斗渠正在防渗改造中。由于灌区地处欧亚大陆腹地，冬季漫长而寒冷，渠系工程最主要的病害是冻胀破坏，为此，灌区在改造渠道时首先要考虑防冻胀问题。2001 年在水利部的大力支持下，大型灌区（北屯灌区）续建配套与节水改造项目工程正式启动，北屯灌区的场外骨干渠道总干渠、二干渠、三千渠、南关水库引水渠得以改建配套。续建配套工程项目多为旧渠改造工程，在原渠基上改扩建和铺设渠道防渗体，防渗形式主要有四种，分别为塑膜防渗（总干渠）、塑膜+现浇混凝土衬砌复合防渗（总干渠）、塑膜+预制混凝土板复合防渗（二干渠、南关水库引水渠等）、预制混凝土板+雷诺护垫护底（三千渠）。

（2）渠道防渗防冻胀技术应用

北屯灌区为防止渠道衬砌体的冻胀，从渠道冻胀破坏的三个基本因素土、水、温着手，因地制宜，针对不同情况，采取合理的防冻胀措施；针对渠底部位出现的泥岩，将渠底预制砼板防渗型式改为柔性防护型式，即雷诺石笼护垫型式（镀锌双绞合低碳钢丝网格雷诺护垫）；针对地下水位高影响施工进度和质量的情况，则采取暗管棱体排水、排水沟、排水管、排水涵管等形式多样的排水法；若遇渠段中有低液限粘质土（冻胀土）出露，解决的方法采取就地取材，把渠床冻结深度以内的冻胀土壤更换为非冻胀土，如沙砾料；为了控制砼冻胀蔓延，降低砼渠道的冻胀维修成本，推广应用间隔梁，人为的分割成多个小单元块，达到减轻冻胀破坏的目的。

（3）典型渠道（渠段）防渗防冻胀技术措施

北屯灌区总干渠和三千渠是灌区内骨干渠道中长度较长的渠道，渠道在分年度续建配套与改造中，由于工程地质条件、防渗形式的不同，所采取的防渗防冻胀技术措施也各有所不同，现以总干渠和三千渠作为北屯灌区典型渠道进行分析。

1) 北屯灌区总干渠

北屯灌区总干渠全长 28.007 公里，从额尔齐斯河拟建的角萨特水利枢纽处引水，该工程为 2001 年度北屯灌区续建配套与节水改造的国债项目，总投资 1257.18 万元。工程分为三段：第一段（0+000-13+950）结构设计为均质土渠，为旧渠（老二干渠）扩建段，设计流量 $45\text{m}^3/\text{s}$ ；第二段（13+950-16+580）2.63km，向二级电站及下游输水，结构设计为塑膜单防渠道，设计流量 $25\text{m}^3/\text{s}$ ；第三段

(16+580-28+007) 11.427km, 向三千渠及三级电站分水, 结构设计为塑膜现浇砼衬砌双防渠道, 设计流量 $13\text{m}^3/\text{s}$, 此段为新建段。工程沿线各类建筑物 40 座, 其中分水枢纽两座, 分别位于 13+950 和 16+580 处, 桥 11 座, 涵 18 座、闸 6 座、渡槽 4 座, 跌水 1 座。工程于 2003 年竣工使用。

①暗管棱体排水法

总干渠防渗防冻胀工程在地下水位较高的渠段, 采用暗管棱体排水法, 即先在该渠段的渠侧底部铺设一条顶部稍高于底板的砾石排水棱体, 将各渗水点连通起来, 再沿渠道每隔一定距离在排水棱体中水平插入一根长约 1m 钻有梅花孔的排水钢管, 然后再铺设塑膜、浇筑砼板。通过这种排水措施, 渗水通过砾石棱体集中从管子流出, 快速降低了地下水位, 减少了地下水顶托压力。既能正常进行铺设现浇砼的施工程序, 又解决了砼板块顶起和冻胀的问题, 从而保证了边板与底板的质量, 方法简单实用。

②置换法(换土法)

根据北屯灌区总干渠沿线工程地质调查及试验资料显示, 总干渠大部分渠段为砂砾石覆盖物, 其粗粒土中粒径小于 0.05mm 的土粒重量占土样总重量的 6% 以下, 为非冻胀性土。在渠道部分渠段中有泥岩出露, 根据分析此处泥岩属低液限粘质土, 属冻胀土。冻胀性土壤的存在是导致渠床基土冻胀的首要因素, 解决的方法就是把渠床冻结深度以内的冻胀土壤更换为非冻胀土, 如沙砾料。根据置换法的原理进行置换后, 取得了较好的效果。

2) 北屯灌区三千渠

三千渠修建于 1959 年, 全长 20.2km, 控制灌溉面积 11.24 万亩。三千渠从引水总干渠末分水枢纽处分水, 设计引水流量 $10\text{m}^3/\text{s}$, 其中发电用水 $5\text{m}^3/\text{s}$ 。

①雷诺护垫的应用

三千渠部分渠段的地下水位较高, 且渠底为泥岩, 为适应变形、冻胀和防止冲刷等, 将渠底预制砼板防渗型式改为柔性防护型式(见图 3-1), 即雷诺石笼护垫型式(镀锌双绞合低碳钢丝网格雷诺护垫, 见图 3-2), 该技术产品是引进意大利生产工艺由中外合资生产的一种新镀锌合金产品, 能在水中 20 年不生锈, 内装卵石, 有很好的透水性, 能防止冻胀。工程于 2004 年 10 月完工, 次年投入使用, 通过几年的运行观察, 雷诺护垫的应用很好地解决了北方地区冬季渠系渠

底鼓包、冻胀、变形问题，便于季节性施工，无需维修。

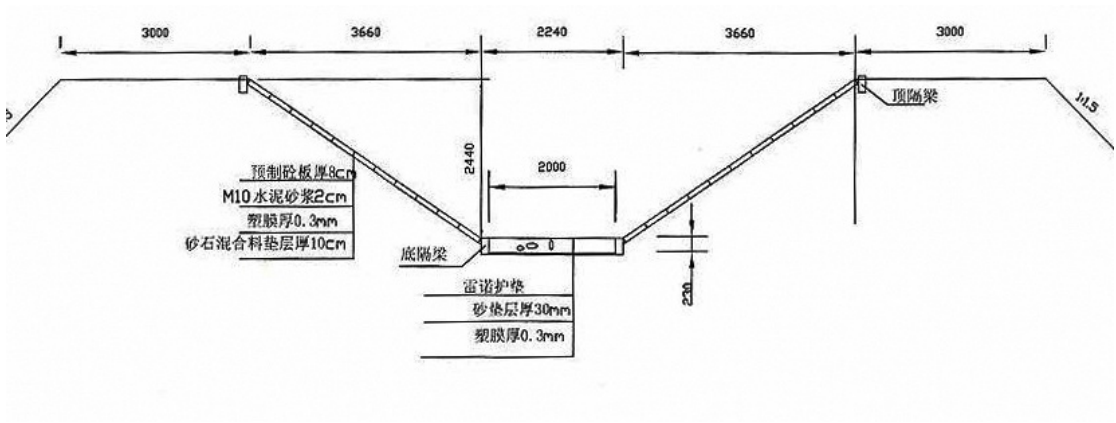


图 3-1 三干渠渠底柔性防护型式结构示意图



图 3-2 雷诺护垫

②间隔梁法

冻胀是灌区渠道遭受破坏的主要原因，这与灌区普遍进行秋灌有直接关系，特别是骨干渠道沿线的地下水位有时甚至高于渠底，致使冻胀量过大，针对此情况，三干渠在防渗衬砌工程设计时，根据渠道纵坡坡降的不同，每隔 10m 或 20m 在砼双防渠道之间增设一间隔梁。这使连成一整体的砼，被人为的分割成多个小单元块，从而起到了控制砼冻胀蔓延的作用，还达到了防冲的目的。间隔梁的应用，大大降低了砼渠道的冻胀维修成本。后在北屯灌区的二干、三干渠中得以广泛推广运用。

③排水涵管的应用

北屯灌区三千渠 0+000 至 16+760 段位于排水渠右侧，该排碱渠原为上世纪五十年代的老三千渠，排水渠与三千渠之间共用一个渠堤，属两渠三堤。在灌溉后，排水渠内水位明显偏高，若不及时排水，必将引起三千渠左侧渠堤土壤含水量增大，进入冬季后，土体中的含水不能有效的排出，从而造成冻胀破坏。为解决此问题，分别采取在 9+400、13+300、16+400 处采取渠底埋设 $\phi 75\text{cm}$ 的排水涵管，将排渠内的积水及时由排水涵管排入渠道边的一个自然大洼地，避免三千渠左侧渠堤土壤含水量增大。通过埋设排水涵管，有效解决了此段渠道的防冻胀问题。

（4）渠道防渗防冻胀技术应用效果

采取防冻胀措施后，渠道运行状况明显好于无防冻胀措施的渠道，由于防冻胀技术措施的采用，保护了工程，冻胀量得到大幅度削减，减少了工程由于渠道基土冻胀而形成的破坏，保证了灌溉工程的正常运行，提高了灌溉效益。其效果主要表现在如下几方面：

①冻胀破坏的程度明显较轻，渠道破坏的面积较小，所需的工程维修费用少。

②防冻胀技术的采用，优化了渠道的受力结构，提高了渠道的抗冻、防渗能力，延长了工程的使用寿命，工程的使用寿命比较从前可以延长 2-3 倍。图 3-3 为防渗衬砌后已运行 7 年的北屯灌区总干渠，图 3-4 为渠底采用柔性防护型式已运行 6 年的北屯灌区三千渠。



图 3-3 防渗衬砌后的北屯灌区总干渠（已运行 7 年）

③为确保工农业全年的正常引、输、供，水管处渠道工程的维修一般安排在

春灌前和秋灌后，春灌前的维修多数是因冻胀所引起的破坏，这段时间较短，工程多数属抢修，但采取抗冻胀技术的渠道，因为破坏程度轻，维修面积小，有效的节约了时间，确保了农业灌溉的及时供水。



图 3-4 渠底采用柔性防护型式的北屯灌区三千渠（已运行 6 年）

3.2.1.2 新疆呼图壁河灌区

（1）灌区概况

呼图壁河灌区位于新疆呼图壁县，介于东经 $86^{\circ} 05'$ - $87^{\circ} 08'$ ，北纬 $43^{\circ} 07'$ - $45^{\circ} 20'$ 之间。灌区年平均气温 6.5°C ，极端最低气温 -36.8°C ，极端最高气温 41°C ，年平均降水量 180mm，年平均蒸发量 2383.9mm，最大冻土深 1.5m，呼图壁河是灌区的主要水源。从呼图壁河的分水岭到准噶尔盆地的沙漠腹地，地形总趋势是南高北低，由东南向西北倾斜。按大的地貌单元来分，呼图壁县可分为：南部山区、中部平原和北部沙漠三大单元。中部平原区东西宽约 50km，南北长约 102km。地形由南向北倾斜。山前冲洪积扇海拔高程 800m 以下，地面坡降 $3.5\% \sim 1.4\%$ ，坡度由陡变缓。冲洪积扇前缘海拔高程 500m 左右，地形坡降 $1.4\% \sim 0.5\%$ 。中部细土平原区到沙漠边缘海拔高程由 500m 降到 360m，地形坡降 $0.5\% \sim 0.9\%$ 。

呼图壁河灌区有干、支、斗、农四级渠道 3909km，已防渗衬砌渠道 1507km，其中呼图壁县有干、支、斗、农四级渠道 2074km，工程化防渗渠道 1123km；灌区渠系利用系数达到 0.8。灌区有灌溉机电井 1252 眼，配套完好的有 1172 眼，其中呼图壁县有机电井 716 眼，配套完好的有 655 眼。

呼图壁县青年干渠总长 20.5km，恢复最大设计引水能力 $45\text{m}^3/\text{s}$ ，渠道断面设计采用现浇砼板、浆砌石、干砌卵石灌浆衬砌等防渗技术进行处理。

（2）典型渠道（渠段）防渗防冻胀技术措施

1）青年渠首至青年干渠三闸（0+00—1+900）渠段

①地层岩性及水文地质概况

青年渠首至青年干渠三闸（0+00—1+900）渠段位于呼图壁河出山口至河流中下游一带，在地貌上属呼图壁河冲洪积倾斜平原的顶部，地势倾向北东，地面坡降为 1%~2%。在该段，呼图壁河河谷由窄变宽，下游阶地阶面变宽，级数减少（通常为 I—IV 级），阶地类型也变为侵蚀堆积阶地。

本区地层岩性主要为呼图壁河 I-II 级阶地 Q3-4 期卵砾石层及现代河床 Q4 期卵砾石、粉土层，岩性比较单一，厚度变化较大，受区域构造影响阿魏滩渠首一带卵砾石层厚度大于 100m，独山子渠首一带厚度仅为 10~20m，三闸一带厚度大于 100m。

工程区上游一带卵砾石为结构松散的含水岩组，地下水为河道潜流，水位埋深 0.5~2m 不等，平均渗透系数 50~60m/d，单井涌水量 10~15L/S；工程区下游一带（县城一带），地下水类型为上部潜水，下部承压水，水位埋深大于 20m，平均渗透系数 10~60m/d，单井涌水量 5~15L/S。

②防渗防冻胀措施

该渠段横断面采用弧底梯形，渠底采用浆砌石，渠坡采用混凝土衬砌，详见图 3-5。渠底采用 30cm 厚 C20F200 细石砼浆砌石砌筑，护坡采用 8~10cm 厚 C20F200 砼衬砌。为提高护坡抗冲刷能力，护坡底角 30cm 范围内采用 30cm 厚的浆砌石砌筑，内外边坡系数确定为 2.25。

浆砌石要求采用鹅卵石，且大头朝下，长边垂直于水流方向，卵石之间必须保证六边靠，三角眼，最后用细石混凝土灌缝并原浆勾缝。

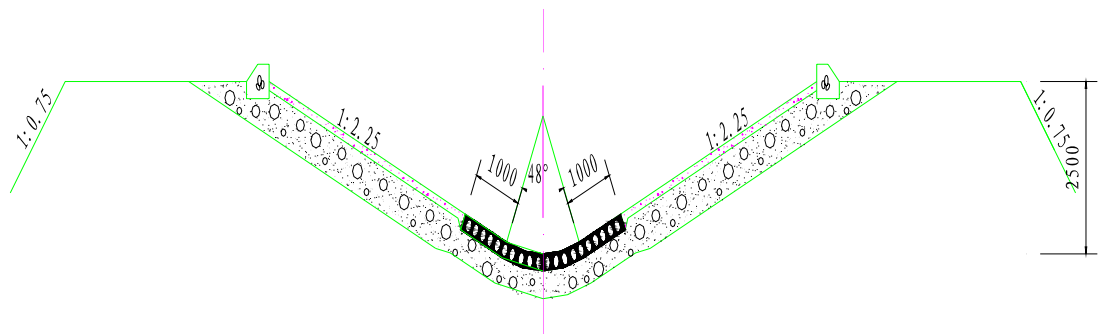


图 3-5 青年渠首至青年干渠三闸渠段横断面结构图

2) 青年干渠（铁路桥以下渠段）

①地层岩性及水文地质概况

该渠段位于呼图壁河东岸Ⅱ级阶地上，地形平坦开阔，地面坡降 11‰，据勘探资料，地层岩性为大厚度结构较为单一的卵石层，厚度大于 6.0m，该区地下水埋深大于 80m。本区卵石层一般为稍密中密状，渗透系数 K 为 40~50m/d，天然容重 γ 为 2.3T/m³。最大冻土深度为 1.5m。

②防渗防冻胀措施

该渠段横断面采用梯形，渠底采用浆砌石，渠坡采用混凝土衬砌，详见图 3-6。渠底采用 30cm 厚 C20F200 细石砼浆砌石砌筑，护坡采用 8~10cm 厚 C20F200 砼衬砌。为提高护坡抗冲刷能力，护坡底角 30cm 范围内采用 30cm 厚的浆砌石砌筑，内外边坡系数确定为 1.5。浆砌石要求最好采用鹅卵石，且大头朝下，长边垂直于水流方向，卵石之间必须保证六边靠，三角眼，最后用细石混凝土灌缝并原浆勾缝。

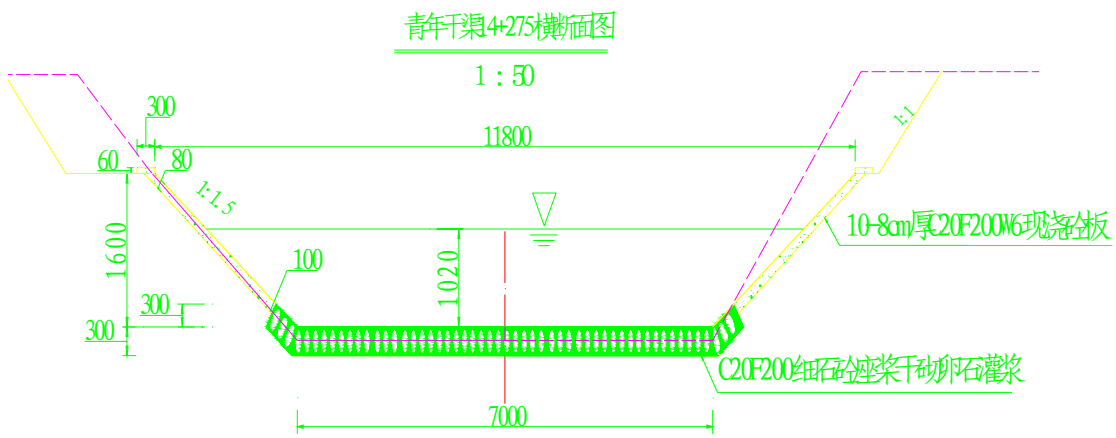


图 3-6 青年干渠(铁路桥以下渠段)渠道横断面结构图

(3) 渠道防渗防冻胀技术应用效果

呼图壁河灌区渠道防渗防冻多采用混凝土面板与浆砌石渠底相互结合的防渗防冻胀措施,实践证明,这些措施在渠道防冲、抗渗、抗冻方面效果都很明显,冻胀破坏的程度得到明显改善,工程维修费用减少,并延长了工程使用寿命。

3.2.1.3 新疆三屯河灌区

(1) 灌区概况

三屯河灌区位于新疆天山北麓中段,准噶尔盆地南缘,地理位置界于东经 $86^{\circ} 24' 33''$ - $87^{\circ} 37'$, 北纬 $43^{\circ} 6' 30''$ - $45^{\circ} 20'$ 之间,灌区内宜农面积 110 万亩,耕地面积 88 万亩,有效灌溉面积 74.6 万亩。三屯河流域地处欧亚大陆腹地,准噶尔盆地南缘,远离海洋。其气候特点是四季分明,夏季干旱炎热,冬季寒冷漫长,春季温度变化剧烈,冷空气活动频繁,秋季降温迅速,天气晴朗。南部海拔 3600m 以上高山区年平均温度在 -5°C 以下,中低山区的年平均气温 5.5°C ,平原区多年平均气温为 6.1°C ,沙漠区多年平均气温为 5.7°C 。最大冻土深 1.0-1.2m。三屯河流域高山区平均年降水量在 600mm 以上,中低山区平均年降水量 400~500mm,中部平原区平均年降水量 180mm,北部沙漠区平均年降水量小于 150mm。平原地区年蒸发量 2390mm,沙漠边缘年蒸发量 2600mm,南部山区年蒸发量最小,仅 1587mm。

三屯河灌区骨干工程有三屯河水库蓄水工程一座,为中型水库。正已完成除险加固的小(1)型水库六座,引水工程两座:东干渠首和西干渠首;输水工程两座:东干渠和西干渠。干渠以下渠道有三级:支渠、斗渠、农渠,其中支渠 12 条,62.17km,斗渠 667.18km,农渠 1132.3km。合计 1799.48km。闸门 521 座,桥涵 125 座,量水堰 83 座。末级渠道防渗率 43%,断面形式多为梯形、U 型,采用浆砌石、砼板预制、砼现浇等防渗形式。

(2) 渠道防渗防冻胀技术应用

三屯河灌区地处北疆地区,冻害对防渗衬砌渠道危害极大,影响渠道工程的使用寿命和使用效果。为此,主要从以下几方面采取措施防治冻害。

①严格技术设计。改变认为渠道防渗设计简单的观点,要求必须把好技术设

计和施工设计两大环节，在设计中要按规范标准，对采用的防渗措施有充足的论证，对所处地区的水、土、温条件，尤其是当地的冻结条件、经济效益、已有的工程经验做出科学分析，让设计建立在科学依据的基础上，对工程施工条件和方法等做出全面安排，确保工程质量。

②防渗衬砌结构形式选择。对衬砌渠道结构形式的设计，要从抵抗冻胀角度出发，由砼预制板改为砼现浇板，这种衬砌设计观点对于基土水分不高的填方渠段可以解决问题。而对于采取措施也难以降低渠道基土水分的挖方渠段，仍不能彻底解决问题，按照“适应、消减、局部抵抗”的设计观点，从降低基土水分，提高基土温度，增加砌体刚度三个方面考虑。通过近年来的实践和探索，在阴坡渠段防渗抗冻效果较好的衬砌结构形式有：一是板膜复合形式，即在砼板下铺设防渗膜料，膜料主要采用复合土工布膜，这种形式适用于地下水位低的填方渠段；二是预制砼槽形板，这种形式适用于地下水位较低的一般渠段。

③渠道断面形式的选择。渠道断面形式的好坏与防渗抗冻密切相关。U形渠槽衬砌断面形式，主要在斗农渠及小断面支渠（设计流量小于 $1.0\text{m}^3/\text{s}$ ）上推广应用；混凝土弧形坡脚梯形断面或弧底梯形断面形式，在分干、支渠（设计流量 $1.0 \sim 10\text{m}^3/\text{s}$ ）上推广应用；对于设计流量在 $10\text{m}^3/\text{s}$ 以上的分干、干渠选用梯形或平底弧角梯形断面形式。

④加强运行管理。合理确定每年冬前停灌和开春灌溉的时间，对防止渠道冻胀也是至关重要的，根据三屯河灌区的实际情况，一般冬前停灌时间选在 11 月上旬以前，开春灌溉时间在 4 月中旬为宜。

（3）典型渠道（渠段）防渗防冻胀技术措施

1）西干渠 0+000 ~ 1+225、1+450 ~ 5+075 段渠道改造工程

西干渠 0+000 ~ 1+225 原断面为梯形断面，下部深 1.0m 为卵石灌浆，上部深 3.0m 渠坡为砼衬砌；1+450 ~ 5+075 段原断面为卵石灌浆弧形渠底，现浇砼渠坡的梯弧形断面。在改造工程设计上采用了弧形坡脚梯形断面形式，即在现渠底上重砌卵石渠底，渠坡在原坡上重浇砼板，增强了渠道的防冻胀性能。

[illegible]

A photograph showing a river channel. The left bank is dark and appears to be covered in dense vegetation or a thick layer of organic material. The right bank is light-colored, possibly sandy or silty, and shows signs of erosion with a steep, exposed face. The water in the channel is a murky, greenish-brown color. The river flows from the top of the frame towards the bottom.

- 34 -

2) 西干渠 9 公里渠道防渗衬砌改造工程

西干渠运行已有四十余年，渠道已经老化，影响了渠道的正常运行，渠道利用系数较低。途中，虽经过多次局部修缮，耗费大量资金，仍未根本解决问题。仍然存在以下问题：一是由于渠道纵坡较大，渠底浆砌卵石已遭到水流的冲刷破坏，个别区域的浆砌卵石渠底石头已松动或被磨平；二是渠道的混凝土边板年久失修，部分边板已经表面分化剥落，甚至被水流冲坏；三是由于局部混凝土边板后的强冻胀作用，造成渠道边板裂缝、隆起、断裂、塌陷，凸凹不平，直接影响渠道的过流能力；四是渠道纵坡变化频繁，水流状态较紊乱，对渠道的运行不利。以上几个因素增大了混凝土板的糙率，降低了渠道防渗及输水能力，加速了渠道的破坏，形成恶性循环。西干渠衬砌改造工程是对渠道磨损破坏较严重的的 5 + 080 - 14 + 675 段渠道衬砌改造，改造段原过水能力 $25\text{m}^3/\text{s}$ ，改造后的设计流量 $33\text{m}^3/\text{s}$ ，可满足下游灌溉要求。

① 改造仍按原渠道断面进行施工，在原渠道浆砌卵石和现浇砼板表面衬砌新混凝土。

② 在渠道两边沿边口增加了混凝土浇筑的沿口边墙，墙高 0.15m，墙厚 0.2m。由于各段渠道口宽不一，沿口边墙放线时采用平缓过渡连接。

③ 已冻胀破坏渠堤边坡的处理。凡是发生冻胀破坏局部隆起的渠堤，均采用揭除原混凝土板，挖出边坡上 0.5m 厚的土层，替换为河床戈壁料，分层夯实填筑，干容重不得小于 $19\text{kn}/\text{m}^3$ ，人工整修成型后，再浇筑混凝土。对于新填筑的渠堤，填筑干容重不得小于 $17\text{kn}/\text{m}^3$ 。

④ 新、老混凝土接合面处理。对于渠堤边坡原衬砌板基本完好的或不需要进行挖除替换的渠堤，原混凝土板可作为新浇筑混凝土的基底面。

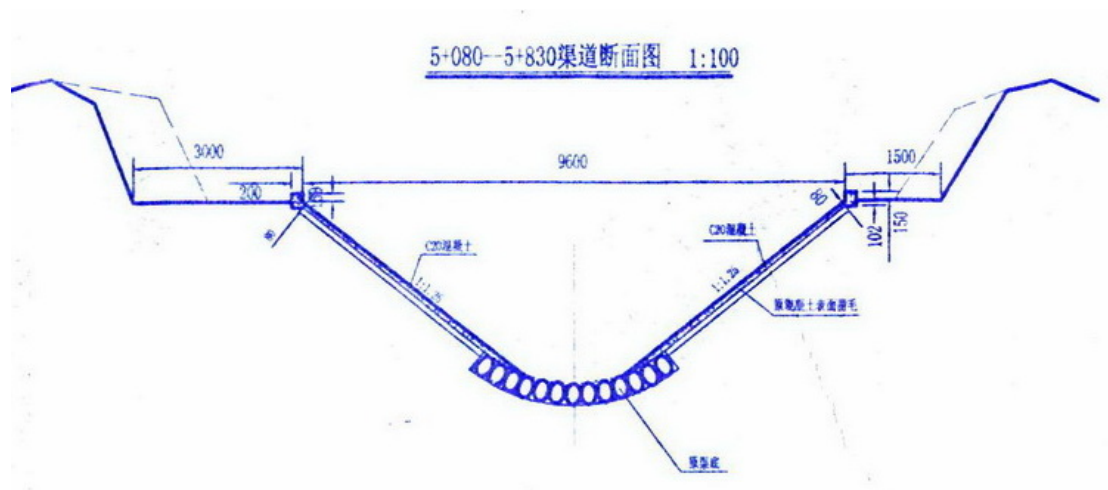


图 3-10

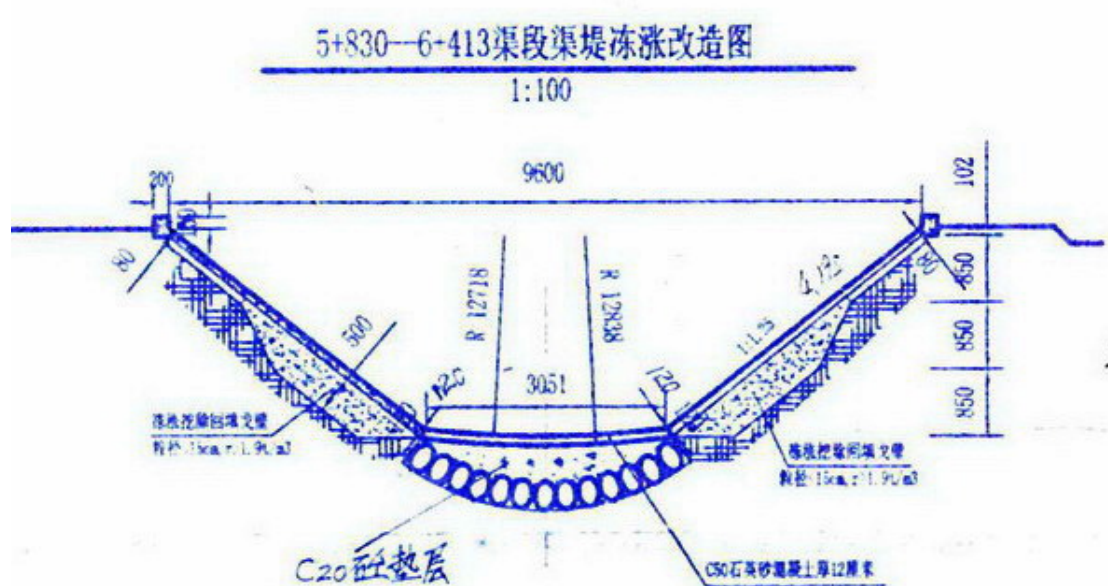


图 3-11



图 3-12

3) 生态渠 21+000 ~ 30+493 段防渗防冻胀扩建改造工程

生态渠工程位于三屯河西干渠末端的大西渠镇境内，设计流量 $6\text{m}^3/\text{s}$ ，该段渠道防渗防冻胀扩建改造工程采用梯形断面，衬砌形式选用两布一膜复合土工膜加现浇混凝土板的型式。由于渠道渠基均为粉土或粉质粘土，具有一定的持水性，渠道地下水位在渠底以下 2.0-3.5m，原渠道没有设置必要的防冻胀措施，因此造成渠道混凝土边板冻胀破坏严重，直接影响渠道的过流和防渗能力。

防渗防冻胀技术措施、工程结构型式及材料：渠道湿周是最易发生冻胀的部位，改造时将湿周范围内的土体挖出 0.3m，用砂石垫层置换，并夯实回填，回填后的干密度要求达到 $2.1\text{g}/\text{cm}^3$ ，压实系数达到 0.95，渠道填方部分分层夯实，填筑干密度大于 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ ，分层厚度 15-20cm。现浇混凝土衬砌板每 2.0m 沿纵向设伸缩缝，缝内灌聚氨酯防水油膏。为防止冻胀，渠道混凝土板以下设 30-50cm 厚戈壁垫层以及沿混凝土板底部和戈壁垫层以上设置 0.5cm 厚复合土工膜，以利于上放下排，其特点一是达到了防渗效果，二是阻断了毛细水上升，再在渠床 3.0m 以外，每隔约 500m 设置排水管和渗水井，将渗水通过暗管集中导出渠床，以避免渠道的冻胀问题。

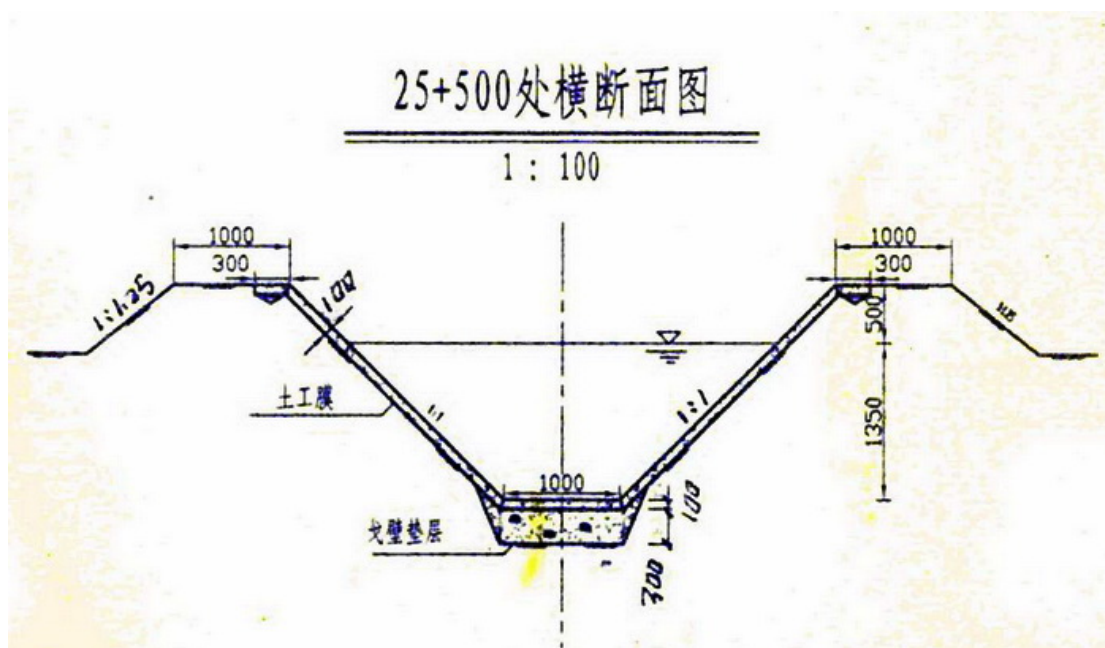


图 3-13



图 3-14

(4) 渠道防渗防冻胀技术应用效果

三屯河灌区在渠道衬砌防渗工程改造中,注重因地制宜采用工程措施和管理措施减轻冻胀对渠道的破坏和影响,渠道冻胀破坏的程度明显较轻,渠道破坏的面积较小,所需的工程维修费用少;采用防冻胀技术的渠道,优化了渠道的受力结构,提高了渠道的抗冻、防渗能力,延长了工程的使用寿命,工程的使用寿命比较从前延长了 2-3 倍。

3.2.1.4 甘肃景电灌区

(1) 灌区概况

甘肃景电灌区（景泰川电力提灌工程）位于甘肃省中部，河西走廊东端，省城兰州以北 180km 处；横跨甘蒙两省区的景泰、古浪、民勤、阿拉善左旗等四县（旗）。灌区东临黄河，北与腾格里沙漠接壤，干旱少雨、风沙多，属于干旱型大陆性气候；灌区范围内地表径流和地下水都很匮乏，灌溉水源来自从黄河提水。景电工程是大 II 型提水灌溉工程，总体规划、分期建设。工程设计流量 $28.6\text{m}^3/\text{s}$ ，加大流量 $33\text{m}^3/\text{s}$ ，兴建泵站 43 座，装机容量 27 万 kw，控制灌溉面积 100 万亩。一期工程 1969 年开工建设，1971 年上水。建成泵站 13 座，装机容量 7.75 万 kw，总扬程 472m；修建干支斗农 4 级渠系，干支渠渠道 20 条 228km，建筑物 980 座。工程设计流量 $10.6\text{m}^3/\text{s}$ ，加大流量 $12\text{m}^3/\text{s}$ ，年提水量 1.48 亿 m^3 ，设计灌溉面积 30.42 万亩。现状斗渠以上渠道衬砌率达到 85%，工程设施完好率 56%，灌区有效灌溉面积 28.42 万亩，亩均毛灌溉用水量 $520\text{m}^3/\text{亩}$ ，复种指数 112%。二期工程 1984 年开工建设，1987 年投入运行。建成泵站 30 座，装机容量 19.25 万千瓦，总扬程 713 米；修建干支斗农 4 级渠系，干支渠渠道 47 条 451 公里，建筑物 2519 座。设计流量 18 立方米/秒，加大流量 21 立方米/秒，年提水量 2.66 亿立方米，设计灌溉面积 52.05 万亩。现状斗渠以上渠道衬砌率达到 80% 以上，工程设施完好率 51%，灌区现状有效灌溉面积 45.55 万亩，亩均毛灌溉用水量 $530\text{m}^3/\text{亩}$ ，复种指数 108%。

景电一期灌区支渠以上渠道工程建设时，由于当时受经济条件的限制，渠道仅采用混凝土板衬砌，部分渠道换填了砂碎石，没有采取其他的防渗和防冻胀措施，灌区支渠以上渠道经过近 40 年的运行，渠道冻胀破坏严重，淤积、滑塌现象时有发生，渗漏水现象严重，渠系水的利用系数降低，输水时间长，灌溉效率低。近几年，随着景电一期灌区续建配套与节水改造项目的实施，景电一期灌区支渠以上渠道工程在改造时，针对渠道不同情况，采取了不同的渠道衬砌防渗防冻胀技术措施，有效缓解和解决了渠道的渗漏和冻胀等问题，提高了渠道工程的质量和使用寿命。

景电二期灌区斗渠以上各级渠道均采用了混凝土板全断面衬砌。渠道因地质条件不同，断面设计及衬砌形式也不同，总干渠设计断面分“土基渠道”和“石

基渠道”两种，“土基渠道”为梯形断面，防渗结构为沥青玻璃丝布或 0.2mm 厚聚乙稀防渗膜、3cm 厚砂浆垫层、混凝土板衬砌；“石基渠道”混凝土板衬砌设计断面分梯形和矩形两种，梯形断面设计边坡大，为不等厚混凝土板衬砌结构；矩形断面设计为重力式浆砌石挡土墙并套衬混凝土预制板或现浇混凝土。支渠多采用梯形、弧底梯形和 U 形衬砌形式，梯形和弧底梯形设有沥青玻璃丝布或 0.2mm 厚聚乙稀防渗膜。防冻胀措施因各种因素，未充分考虑。工程经过近 20 多年的运行，因渠道渗漏水、灌溉回归水等因素地下水位上升，渠道冻胀破坏破坏日益显现，特别是梯形渠段冻胀破坏尤为严重，对渠道的安全运行造成威胁。

景电二期延伸向民勤调水干渠明渠段工程建设时采用聚乙稀防渗膜加混凝土板衬砌结构，渠道横穿灌区，受灌溉回归水和渠道渗漏水的影响，经过近 10 多年的运行，渠道冻胀破坏严重，部分渠段滑塌，渠道的安全运行受到威胁。

（2）渠道防渗防冻胀技术应用

景电灌区渠道以挖方渠道、填方渠道两种形式居多。挖方渠道又以有地下水、无地下水区分；填方渠道大多无地下水。对于挖方（且无地下水）的渠道，在渠道的更新改造中，大多采用换填砂碎石、铺设聚乙稀防渗膜、砂浆垫层、混凝土预制板衬砌结构。砂碎石换填厚度为 30cm~80cm 不等，干、支渠铺设的防渗膜厚度分别为 0.20mm 和 0.18mm，砂浆垫层的厚度为 3cm，混凝土预制板的厚度为 6.3cm；部分支渠段采用聚苯乙烯保温板、铺设聚乙稀防渗膜、砂浆垫层、混凝土预制板衬砌结构。聚苯乙烯保温板厚度为 8cm，防渗膜厚度 0.2mm，砂浆垫层的厚度为 3cm，混凝土预制板的厚度为 6.3cm。有地下水的渠道，在渠道的更新改造中，采用渠底盲沟铺设 $\phi 160$ PVC 排水花管，排水花管周围夯填反滤料，使地下水从排水花管排走。对于地下水特别丰富且地下水位高、冻胀破坏严重的渠道，除采用暗埋排水花管排水措施外，为了抵抗渠道的冻胀，采用较大体积的浆砌石衬砌渠道。

（3）典型渠道（渠段）防渗防冻胀技术措施

景电一期灌区支渠以上渠道工程，土壤地质条件复杂，总干渠穿越灌区段地下水特别丰富且地下水位高，支渠大部分穿越灌区，灌溉回归水和渠道渗漏水使渠堤长期处于水饱和状态，冬季渠道停水期和春季消融期，渠堤饱和水的冻胀与消融，对渠道造成严重的冻胀破坏导致渠道滑坡。因此，在灌区续建配套与节水

改造中，渠道防渗衬砌工程均采取了防冻胀技术措施，现以总干渠（4#隧洞出口至独一农渠段）和西干八支渠作为景电灌区典型渠道（渠段）进行分析。

1）总干渠（4#隧洞出口至独一农渠段）

本段渠道长 240m，原设计流量 $10.56\text{m}^3/\text{s}$ ，加大流量 $12\text{m}^3/\text{s}$ ，设计纵坡 1/3000，边坡系数 1:0.5，渠道原设计断面形式和衬砌结构为梯形现浇混凝土结构。

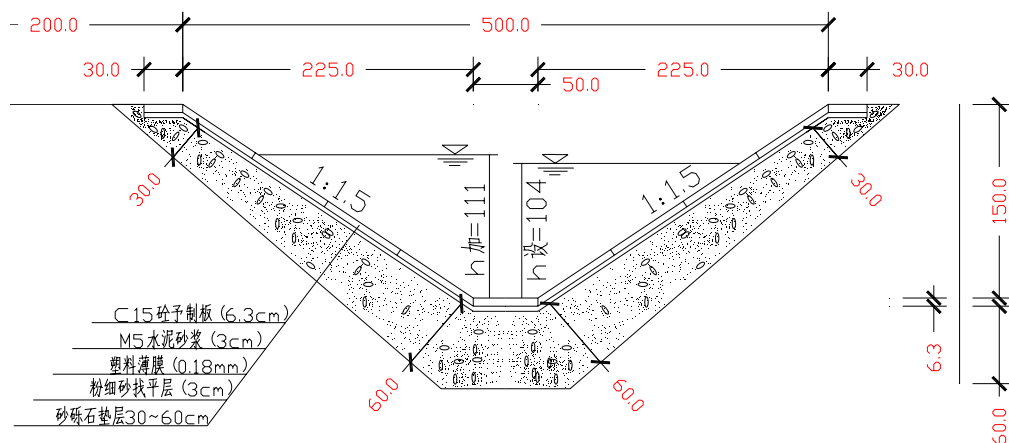
本段渠道处于全灌区最低洼地段，为深挖方岩石渠道，地下水高出渠底 0.3 ~ 0.5m，且不易排出。由于水流冲刷、高矿化度地下水的侵蚀、冻胀破坏，渠底鼓胀、隆起、开裂，渠坡下部混凝土严重开裂、剥落，渠床岩石软化，部分渠段渠坡后侧渠床疏松、塌陷，渠坡混凝土开裂垮塌。

根据本段渠道特殊的工程水文地质条件和冻胀破坏特点，改造时采用预制混凝土板套衬，并在下部设置排水盲沟加设排水花管的改造方案。具体做法是将渠道边坡系数由 1:0.5 调整到 1:0.6，拆除已开裂、剥落、垮塌的渠底及渠坡混凝土，并开挖清理渠床软化、疏松层至坚硬岩石，用 M10 水泥砂浆砌块石加固衬砌拆除部位的渠坡，渠底现浇 12cm 厚 C15 混凝土；保留与渠床粘贴牢固部位的原渠坡混凝土结构层，并将其凿毛冲洗干净；用 M10 水泥砂浆套衬 C15 混凝土预制板，渠坡下部及渠底和渠坡上部及封顶板 C15 混凝土预制板的厚度分别为 10cm 和 6.3cm。渠底下部设置深 80cm 的梯形砂碎石反滤排水沟，沟内设置 2 条 $\phi 160\text{PVC}$ 排水花管，排水花管上包裹一层反滤布，将渠道地下水汇入排水沟（管）内再排入横穿总干渠 12+748 处的灌区总干排水沟，以保证渠道衬砌结构免受地下水的侵蚀。

采用以上渠道改造措施后，彻底解决了渠道的冻胀问题，渠道、渠坡整体结构稳定，渠道内再无地下水出露，渗漏水损失减少，渠道水流顺畅，渠道的输水能力显著提高，安全运行得到了保障。

2) 西干八支渠

西干八支渠 0+000~2+700 段渠道设计流量 $1.8\text{m}^3/\text{s}$ ，加大流量 $2.1\text{m}^3/\text{s}$ ，设计水深 104cm，加大水深 111cm，底宽 50cm，渠深 150cm。该段渠道地下水位较高，受冻胀破坏，原衬砌混凝土板开裂、滑塌破坏严重，直接影响渠道的安全运行和输水能力。改造时采用预制 C15 混凝土板、聚乙烯塑膜防渗层、30~60cm 砂砾石层置换渠底冻土层的的防渗防冻胀改造方案。



- 42 -

西干八支渠 15+016~16+476 段渠道设计流量 $1.08\text{m}^3/\text{s}$, 加大流量 $1.18\text{m}^3/\text{s}$, 设计水深 83.7cm, 加大水深 87cm, 底宽 50cm, 渠深 120cm。由于渠道两侧紧靠农田, 道路狭窄, 砂砾石垫层运输及渠床基础开挖难度大, 改造时采用铺设聚苯乙烯硬质泡沫保温板防渗防冻胀衬砌结构, 渠道衬砌结构从下到上依次为 8cm 厚聚苯乙烯硬质泡沫保温板, 0.18mm 厚聚乙烯防渗膜, 3cm 厚 M5 水泥砂浆垫层, 6.3cm 厚 C15 混凝土预制板。

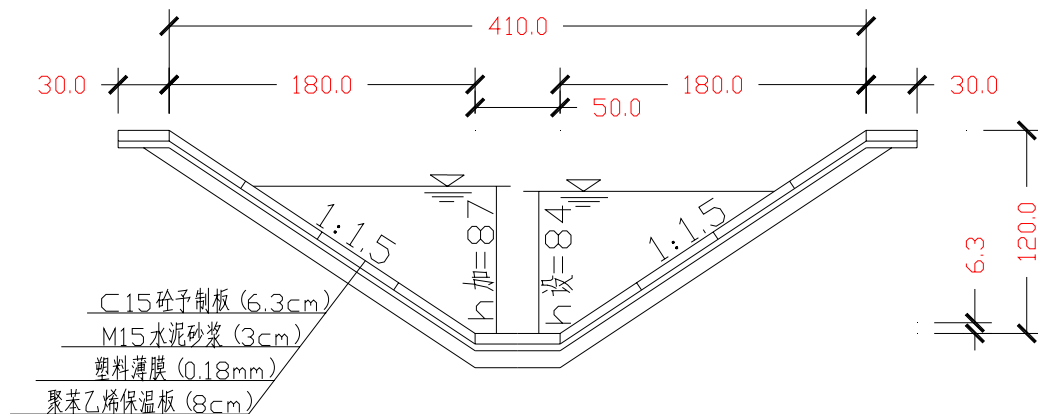


图 3-17 西干八支渠 (15+016~16+476) 渠段横断面结构图

采用以上渠道改造措施后, 渠道冻胀破坏问题得到解决, 渗漏水损失减少, 渠道的输水能力显著提高, 安全运行得到了保障。

(4) 渠道防渗防冻胀技术应用效果

景电灌区在续建配套与节水改造工程实施中, 针对不同地质及运行情况, 采取不同的防渗抗冻胀措施, 渠道的运行安全可靠, 基本杜绝了渠道的冻胀问题, 渠道的渗漏水损失大为降低, 提高了渠道的输水能力和灌溉效率。其效果主要表现在如下几方面:

①对挖方且有地下水的渠道, 采用换填砂碎石、渠底设置盲沟及排水花管, 铺设聚乙烯防渗膜、混凝土预制板衬砌等防渗防冻胀措施, 可以有效地防止渠道的冻胀并减少渠道水渗漏, 大大提高渠道运行的稳定性和输水能力, 保障渠道的安全运行;

②对强冻胀且地下水位高的渠道, 采用大体积的浆砌石衬砌并运用排水盲沟及排水花管将地下水排出渠道的抗冻胀措施, 可以有效地降低渠道地下水位, 大大提高渠道的抗冻胀能力, 从而保证渠道运行的稳定性和输水能力;

③对于渗漏、冻胀破坏严重、渠道运行水深较小且砂碎石运输和渠道开挖难

度大的渠道，采用聚苯乙烯硬质泡沫保温板、聚乙烯防渗膜、水泥砂浆垫层，混凝土预制板衬砌等防渗防冻胀措施，可以减轻施工的难度，并能够有效地解决渠道的防渗防冻胀问题，提高渠道运行的稳定性和输水能力，从而保证了渠道的灌溉能力；

④对于原现浇混凝土衬砌、地下水位较高且渗漏、冻胀破坏严重的渠道，采用水泥砂浆套衬混凝土预制板并运用排水盲沟及排水花管将地下水排出渠道的抗冻胀措施，可以有效地降低渠道地下水位，大大提高渠道的抗冻胀能力和渠道运行的稳定性，有效地改善了渠道的运行状况；

⑤对于半挖半填、傍山和穿山岩石渠床且弯道较多的渠道，采用裁弯取直和铺设聚乙烯防渗膜、水泥砂浆垫层、混凝土预制板衬砌等防渗防冻胀措施，有效地减少了渠道的渗漏水损失，提高了渠道的输水能力，同时有效防止了由渗漏水的冻胀与消融对渠道造成的冻胀破坏，大大提高了渠道的安全运行系数。

3.2.1.5 甘肃友联灌区

(1) 灌区概况

友联灌区位于甘肃省河西走廊高台县中部，地处祁连山和合黎山的交接平原地带，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。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℃，最低气温 -22℃，最高气温 33℃，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。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 m³，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。灌区地貌为河西走廊平原区，海拔 1290~1450m，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。

友联灌区共有干渠 19 条，总长 324km，其中高标准衬砌 184km，衬砌率 56.8

%；支渠 26 条，总长 115km，其中高标准衬砌 109km，衬砌率 94.8%；斗渠 643 条，总长 596km，其中高标准衬砌 383km，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。

（2）渠道防渗防冻胀技术应用

友联灌区中常采用现浇混凝土或预制混凝土砖衬砌渠道。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。

① 置换措施

置换措施是友联灌区渠道防渗工程中应用最普遍的防冻胀技术，适用于当地或附近有较丰富的非冻胀性土的地方。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渠段的渠段，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 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。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。

③ 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，但防渗效果较差。

④优化结构

友联灌区干支渠道断面大多采用弧底梯形断面形式，斗农渠断面多采用 U 形断面形式，与梯形断面相比，U 形断面、弧底梯形断面适应冻胀变形能力强，采用这两种断面形式有效地减轻了渠道的冻胀破坏。

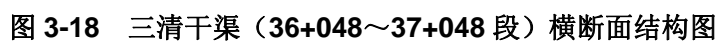
（3）典型渠道（渠段）防渗防冻胀技术措施

友联灌区近年来在渠道防渗工程中，采用混凝土衬砌层下铺设聚苯乙烯泡沫板，起到了很好的防冻胀效果。现以三清干渠 36+048 ~ 37+048 段为典型渠道（渠段）进行分析。

三清干渠 36+048 ~ 37+048 段，设计流量 $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ，加大流量为 $3.13 \text{ m}^3/\text{s}$ 。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 $25\text{kg}/\text{m}^3$ ，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。渠道设计横断面见图 3-18。



友联灌区在各种防冻胀措施中,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。

采用砗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。

友联灌区是首次采用聚苯乙烯保温板作为渠道防冻胀措施,为了确定最佳保温板设计厚度与密度,结合工程建设,在桩号 37+048~37+108 段设计 6 组不同厚度、不同密度的保温板进行抗冻胀试验,具体情况见表 3-1。并设 1 组砂砾石垫层对比试验段,设计垫层厚度阴坡 105~70cm,渠底 95cm,阳坡 70~45cm。

桩号	长度/m	保温板密度/kg/m ³		保温板厚度/cm)	
		阴坡	渠底	阳坡	
37+048--37+058	10	20	12	11	8
37+058--37+068	10	16	12	11	8

37+068--37+078	10	20	10	9	7
37+078--37+088	10	16	10	9	7
37+088--37+098	10	20	8	7	5
37+098--37+108	10	16	8	7	5

为定量研究保温板抗冻胀效果，在每组试验段渠道上埋设冻胀量观测杆、地温观测仪和土壤含水量观测仪，共埋设观测管 120 根，其中：地温观测管 36 根，地下水观测管 36 根，冻胀及冻深观测管 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，6 组试验段经过三个冬季的观测，均没有冻胀破坏现象出现，观测结果表明采用聚苯乙烯保温板防冻胀效果非常明显。

3.2.2 东北地区

3.2.2.1 黑龙江音河灌区

（1）灌区概况

音河灌区位于黑龙江省甘南县境内、嫩江右岸一级支流音河的中下游两岸。灌区总面积 55 万亩，耕地面积 40.92 万亩，设计灌溉面积 32 万亩，其中水田 12.6 万亩，旱田 18.26 万亩。灌区地处高纬度，属于寒温带大陆性季风气候，季节变化明显，冬季漫长，严寒少雪；春季多风少雨，气候干旱；夏季温热多雨，空气湿润；秋季降温急速。年平均温度 $2^{\circ}\text{C} \sim 3^{\circ}\text{C}$ ，年平均降水量 470mm，年平均蒸发量 1350mm，冻土深度为 2.0~2.4m，多年平均风速 3.0m/s。地下水类型为音河河谷冲积潜水，含水层为混合砂砾石构成，潜水埋深 1~3m，呈季节性变化，含水层厚度 25~50m，储量丰富。地下水补给水源主要是大气降水及地下径流侧向补给，其次为干渠渗漏及田间补给。由于地下水补给及排泄条件好，形成良好的地下水水质。灌区内土壤主要土类为草甸土，砂底或砂砾底，质地为中壤，黑土层 20~40 cm，PH 值 6.6~7.0，耕作层有机质含量丰富，土层结构及透水性好，保水、肥能力强，适宜种植水稻。

2000 年 4 月纳入大型灌区管理，并且音河灌区续建配套与节水改造工程 2000 年也列入国家投资计划，工程于 2001 年 8 月开工，至目前共完成干渠防渗 19.357 公里，支渠防渗 31.36 公里，干渠土方达标 3.246 公里，六支渠土方达标 3.694 公里，五支沟土方工程 8.855 公里，坡水截流沟工程 6.743 公里，建筑物 130 座。已完成的渠道防渗工程运行状况良好。

（2）典型渠道（渠段）防渗防冻胀技术措施

1) 用水一千渠防渗措施

音河灌区一千渠全长 26km，土质为砂性土，渠底为砂、砾石层，渠道渗漏严重。已完成的 19.357km 用水一千渠防渗桩号为 0+000~19+357。防渗措施基本上为渠底及边坡均采用复合土工膜（两布一膜，400g/m²）防渗；渠底膜上铺 50cm 砂砾石作为保护层；边坡采用现浇或预制混凝土板为保护层，板厚 10cm，板下设 10cm 砂垫层，下铺复合土工膜，膜下设 10cm 砂垫层，边坡比为 1: 2；堤脚为 30×80cm 混凝土固脚，下垫 20cm 砂垫层。混凝土设计强度 C20，抗冻等级 F200，混凝土外加剂采用黑龙江省水利科学研究院研制的 SB-G 液体引气剂，掺量为水泥用量的 2‰。

以下几段渠道根据不同情况，防渗防冻胀措施有所改变。

①0+000~3+800 段，由于该段渠道右侧为丘陵坡脚，坡水发生时水位较高，当干渠内水位较低时，坡水对护坡混凝土板产生压力，容易造成滑坡，因此在该段坡脚处增设排水钢管，间距每 10m 一个，坡脚纵向加一排钢筋笼，外裹一层无纺布，护坡板上部设排气孔，间距 40m 一个。这种措施减少了渠基土壤的含水量和对坡面混凝土板的压力，保证了防渗衬砌结构的稳定，因此，渠道没有发生冻胀破坏、滑坡现象，运行效果很好。见图 3-19。

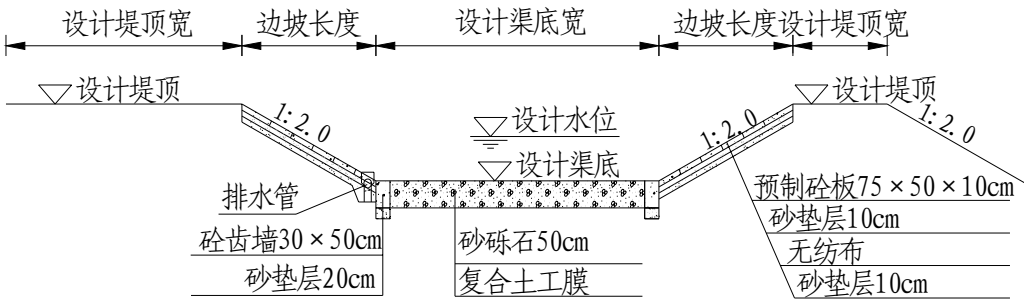


图 3-19 0+000~3+800 渠道断面图

②7+350~8+700 段渠道基本为挖方渠道，地下水位较高，当渠内无水时，渠道边坡受地下水侧向水压力顶托，对渠道边坡稳定不利。因此，边坡防渗只采用预制混凝土板，板下设无纺布一层，砂、砾垫层各厚 10cm，边坡比为 1:2；渠底仍采用复合土工膜（两布一膜，400g/m²）防渗，上垫 50cm 厚砂砾石作为保护层，两侧设混凝土齿墙，尺寸 40×80cm，下垫 20cm 砂垫层。这种措施解决

了当地下水位高时对渠坡产生的顶托压力问题，保证了坡面稳定，运行多年来效果良好。见图 3-20。

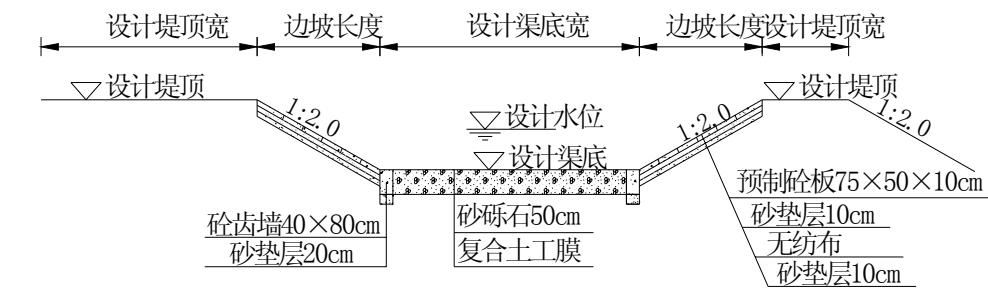


图 3-20 7+350~8+700 渠道断面图

③12+050~14+199 段渠道右侧坡水截流沟的水在此段进入干渠，考虑此段干渠稳定，渠底及边坡全部采用复合土工膜（两布一膜，400g/m²）防渗、混凝土预制板防护结构，板厚 10cm，板下设 10cm 砂垫层，下铺复合土工膜，膜下设 10cm 砂垫层，边坡比为 1:2，堤脚为 30×50cm 砼固脚，下垫 20cm 砂垫层。该渠道运行几年来，未见冻胀破坏现象。见图 3-21。

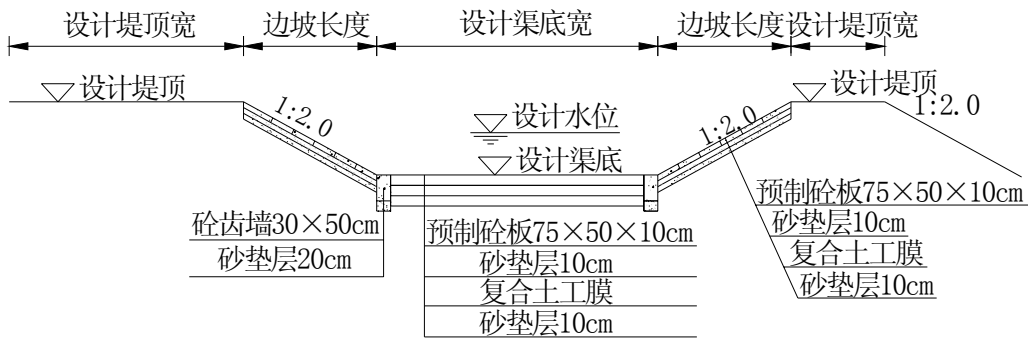


图 3-21 12+050~14+199 渠道断面图

2) 用水支渠防渗措施

已完成的 31.36km 用水支渠防渗，防渗措施为渠底及边坡均采用复合土工膜（两布一膜，400g/m²）防渗，现浇或预制混凝土板为保护层，边坡板厚 8cm，渠底板厚 10cm，板下设砂垫层 10cm，下铺一层复合土工膜，膜下砂垫层 10cm，边坡比为 1:1.5。因支渠底宽不超 5m，故不设固脚。见图 3-22。

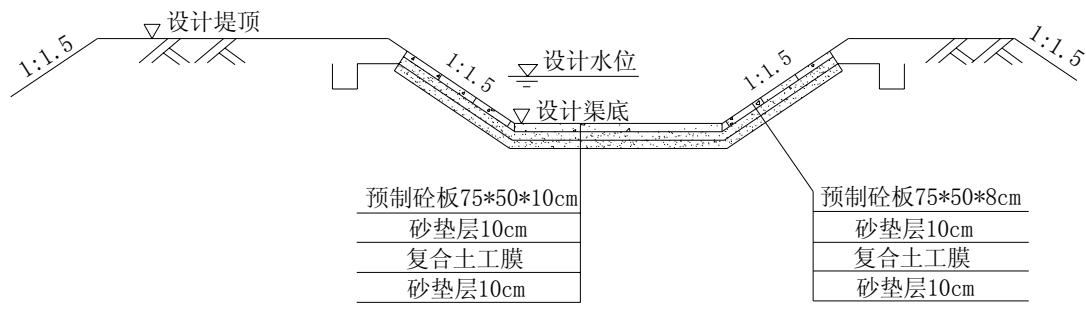


图 3-22 支渠断面图

(3) 防渗防冻胀技术措施应用的体会和经验

灌区渠道防渗防冻胀技术措施,要考虑渠段自然水文、地质等情况具体制定。

1) 当渠段外侧为丘陵坡脚,坡水发生时水位较高,此时要考虑当渠内无水或水位较低时,渠道边坡受坡水侧向水压力顶托,对渠道边坡稳定不利,容易造成滑坡,需在坡面设排水设施。

2) 当渠段为挖方渠道,地下水位又较高时,要考虑渠内无水或水位较低时,渠道边坡受地下水侧向水压力顶托,致使渠道边坡不稳定,容易造成滑坡。因此,边坡不可采用复合土工膜防渗,只采用预制混凝土板护砌,板下铺设无纺布一层反滤,而渠底仍采用复合土工膜防渗。

3) 渠道防渗采用复合土工膜做防渗材料,混凝土护砌板做保护层。对于用水干渠,防渗前断面大、渠底宽,渠底复合土工膜上可采用 50cm 厚砂砾石作为保护层,可加大渠底糙率,减小流速,使设计流速满足渠道不冲、不淤流速要求,可节省工程投资。

4) 为防止冻胀造成复合土工膜及混凝土板毁坏,渠堤回填土以砂性为好,施工时要严格按设计要求分层压实达到设计干容重;砂垫层选用中粗砂,施工时要洒水整平、夯实;严格控制混凝土外加剂掺量及水灰比,含气量控制在 3.5%~4.1%。

(4) 效益评估

1) 灌溉效益

音河灌区自实施灌区续建配套与节水改造建设工程以来,充分利用了有限的水资源,改善和增加了灌溉面积,使有限的土地发挥最大效益,粮食质量和产量得到提高,使音河灌区续建配套与节水改造效益得到充分发挥。

通过渠系防渗衬砌工程,可节约水 13%,通过改进灌溉制度可节约水 5.5%,

通过采用喷灌技术等节水措施可节约水 8.4%，共可节水 26.9%，年节约水量为 1910 万立方米。

音河灌区续建配套与节水改造工程若能全部实施后，可增加水田 4.6 万亩，原有水田改善 8 万亩，旱田井渠结合灌溉由 5 万亩增加到 10.5 万亩，增产粮食 3.66 万吨，可年增效益 6471.34 万元，其中：原灌区灌溉增产效益 856.8 万元，旱改水增产效益 1393.13 万元，旱田低改增产效益 2988.31 万元，蔬菜和果树增产效益 1233.1 万元。

2) 社会效益

音河灌区续建配套与节水改造不仅有可观的经济效益，而且有较明显的社会效益。通过对灌区续建配套与节水改造，充分利用有限的水资源，将低产田改造成稳产、高产田，符合“两高一优”的农业发展方向。退耕还林、还草，对灌区的气候有了很好的改善。粮食质量提高了，产量上去了，农民的收入增加了，农业和农村经济的可持续发展有了保证。

3.2.2.2 黑龙江引汤灌区

(1) 灌区概况

引汤灌区位于松花江下游左岸、汤原县境内、汤旺河以东、松花江以北的平原区，灌区总面积 72.56 万亩，设计灌溉面积 40.24 万亩，地理位置是东经 129° 40' 至 130° 30'。北纬 46° 40' 至 47° 12'。灌区属于小兴安岭山脉东麓边缘，南邻松花江，是三江平原的一部分，地形西北高，东南低，地貌成因主要分为侵蚀、剥蚀低山丘陵区；侵蚀、堆积山前冰水台地和堆积平原区。灌区属于寒温带大陆性季风气候，多年平均气温 2℃，冬季寒冷且漫长，土壤结冻时间在 10 月 25 日左右，在 3 月 30 日左右土壤开始解冻，冻结期长达 5 个月，多年平均冻土深度为 2.0m。该地区多年平均降雨量为 555mm，多年平均蒸发量为 1278mm，多年平均日照 2578 小时。灌区的总干渠和干渠均布设在阶地的边缘。灌区地处低山丘陵与冲积平原的交汇区，全区西北高，东南低，按地貌成因类型可分为：剥蚀地貌～丘陵区；冰水堆积地貌～冰水台地区；河流侵蚀堆积地貌～冲积平原区。该区内大部分为第四系松散堆积物所覆盖，侵入岩出露很少。粘性土厚度一般在 2-4m 左右，其下层为中粗砂和砂砾石，除沟谷外地下水位较深，一般在 4-6m，大部分建筑物基础座落在砂层上。总干渠线路主要穿过冰水台地及一级阶地，地

形起伏较大,岩性组成除 1+400-2+400 桩号段为花岗岩外,其他段基本上都为粗砾、细砾、砂层、砾质壤土等,根据地质图显示从上而下 4-8 米均为含壤土的细砾层,垂直渗透系数 0.0865 厘米/秒。

(2) 渠道防渗防冻胀技术应用

引汤灌区自 1999 年开始实施渠道防渗工程建设以来,截止目前灌区共衬砌渠道 27.3km,其中总干渠 10.6km、北干渠 2.2km、分干渠 14.5km。采取的渠道防渗防冻胀结构措施基本都是预制混凝土板加复合土工膜防渗的梯形渠道方案。只在 2009 年末级渠系工程修建了混凝土 U 形槽衬砌。预制混凝土板尺寸为 60cm × 60cm × 10cm,混凝土标号为 C20F200,复合膜为两布一膜,重量为 400g/m²。渠道防渗防冻胀结构自上而下依次为预制混凝土板、混凝土板下铺 5cm 砂垫层和复合土工膜。对于超过底宽 5m 的渠道设置了混凝土固脚,固脚结构尺寸根据渠底宽度可选为 0.3m × 0.5m 或 0.5m × 0.8m。

(3) 典型渠道(渠段)防渗防冻胀技术措施

1) 引汤总干渠

引汤总干渠建于 2005 年,梯形挖方渠道。总干渠地质剖面图显示自上而下 4~8 米均为含壤土的细砾层,垂直渗透系数 0.0865cm/s,渗透损失较大,必须采取防渗措施。防渗防冻胀结构形式为渠道边坡采用预制混凝土板,板下依次是砂垫层和复合土工膜,坡底设混凝土固脚;渠道的渠底采用复合土工膜上铺 50cm 回填土。预制混凝土板尺寸为 60cm × 60cm × 10cm,砼标号 C20F150,砂垫层为 5cm,边坡复合土工膜为 400g/m²的二布一膜,渠底复合土工膜为 200g/m²的一布一膜。固脚尺寸为 30cm × 50cm × 70cm 的梯形混凝土断面。该渠道虽然是挖方渠道,并经过五年运行,但由于是非冻胀性土渠基,由采用的是预制混凝土板,所以使得运行效果非常好,发挥了应有的输水灌溉效益。见其断面图和照片。

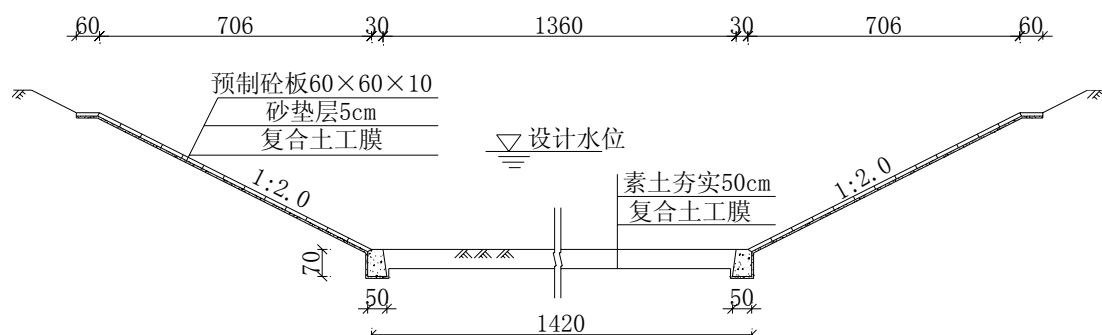


图 3-23 引汤总干渠断面图



图 3-24 引汤总干渠照片

2) 引汤总干解放岗渠道

引汤总干解放岗渠道建于 2000 年，最大挖深达 17m，属梯形大挖方渠道。从地质结构上看，上层土质较好，由粉质粘土和粉质壤土组成，厚度 2-5m，下部为砂层，局部含砾石以粗砂含量最多，存在局部地下水位高的情况。

这段渠道的特点一是渠底座落在砂层上，渠道需要进行防渗处理；二是局部渠段地下水位较高，易产生冻胀破坏，要采取防冻胀措施。据此，渠道防渗衬砌形式采用渠道边坡预制混凝土板下铺复合土工膜，坡底设混凝土固脚，因为是大挖方渠道，固脚尺寸增大到 $60 \times 80\text{cm}$ 。渠坡混凝土预制板为 $60\text{cm} \times 60\text{cm} \times 10\text{cm}$ ，混凝土 C20，渠底采用复合土工膜上铺 50cm 回填土，边坡和渠底的复合土工膜为 400g/m^2 的两布一膜。为解决局部地下水位高导致冻胀破坏问题，在地下水位高的渠段设有排水体。排水体由无纺布包裹河卵石及塑料排水管构成。排水体顺固脚方向放置在固脚外侧，塑料排水管通过无纺布包裹的河卵石和固脚延伸到渠道内，这样就把渠基的地下水引排到渠道内了，减少了渠基土壤含水量，避免产生冻胀，保证渠道防渗衬砌结构的稳定，所以该渠道运行十年来防渗防冻胀效果非常好。

根据该段渠道的纵断图可知，该段渠道的底宽 13.4m，边坡 1:2，设计水深 2.47m，设计流量 $26.06\text{m}^3/\text{s}$ 。由于挖深大，坡面不能全部衬砌，为了防止没有衬砌的坡面土壤塌坡，对裸露坡面进行了植草护坡，植被生长良好，十年来没有滑

坡现象发生，防护效果十分理想。见下面断面图和照片。

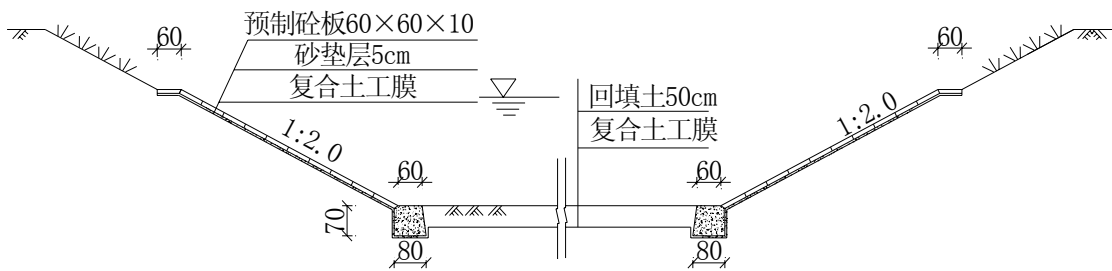


图 3-25 引汤总干解放岗渠道断面图



图 3-26 引汤总干解放岗渠道照片

3) 伏胜干渠

伏胜干渠由总干渠 28+750 桩号引水,全渠长 12.512km, 建于 2001 年, 是半填半挖梯形渠道。伏胜干渠设计流量为 $3.36\text{m}^3/\text{s}$, 底宽 3.0m, 干渠边坡采用 1:1.5, 设计水深 1.12m。由于该干渠为砂土渠基, 故无须考虑防冻胀措施, 此渠道采用全铺全防衬砌结构, 即渠坡渠底全部都铺设预制混凝土块和复合土工膜。

混凝土板厚度 10cm, 板下铺 5cm 砂垫层和复合土工膜, 预制混凝土板尺寸为 $60\text{cm} \times 60\text{cm} \times 10\text{cm}$, 混凝土标号为 C20F200, 复合膜为两布一膜, 重量为 $400\text{g}/\text{m}^2$ 。因渠底宽不超 5m, 所以伏胜干渠没有设置固脚。此干渠经过近十年的运行, 没有发生破坏现象, 运行效果良好。见下图及照片。

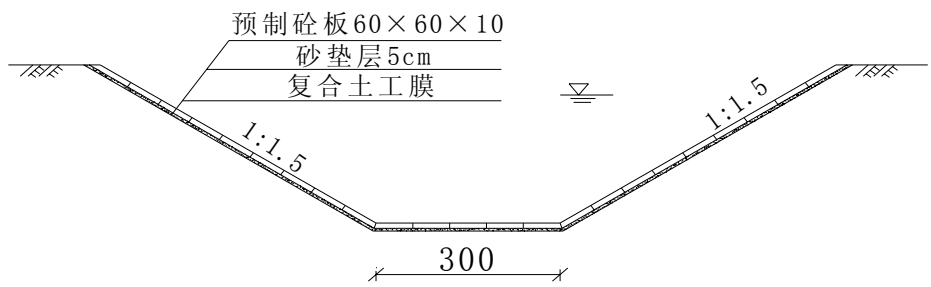


图 3-27 伏胜干渠断面图



图 3-28 伏胜干渠照片

(4) 效益分析及效果评价

灌区自实施渠道防渗工程以来，总干渠防渗衬砌 10.6 公里，减少损失流量 $3.98\text{m}^3/\text{s}$ ，分干渠防渗衬砌 14.5 公里，减少损失流量 $1.17\text{m}^3/\text{s}$ ，按 100 天计算，灌区每年可节水 4449 万 m^3 。灌溉周期平均缩短 5 天，渠系水利用率平均提高 4.6%。实施改造的项目区渠道基本没有跑、冒、滴、漏现象，渠道输水能力、用水效率大幅度提高，保证了灌区用水，缓解了过去农业用水的紧张矛盾。而且伏胜干渠由于进行了渠道防渗，减少了渠道挖方占地，共节省土地 110.4 亩，增加产值 8.89 万元。

通过引汤灌区渠道防渗防冻胀工程措施的应用实践，发现渠道在实施防渗衬砌工程中，结合当地实际情况、因地制宜选择防渗防冻胀结构措施很重要。引汤灌区防渗工程基本为边坡采用预制混凝土板加复合土工膜护砌，渠底采用复合土工膜加回填土的复合结构形式，大大节省了工程造价。特别是对地下水位高的地

区采取的防冻胀排水措施，避免了冻胀破坏发生，减少了工程维修费用，延长了渠道防渗工程使用寿命。解放岗渠道加大固脚尺寸的技术措施，也提高了渠道衬砌结构的安全系数，保证了渠道正常输水运行。

3.2.2.3 黑龙江江东灌区

(1) 灌区概况

江东灌区位于嫩江左岸，齐齐哈尔市东部城郊。灌区水源来自中部引嫩工程，中引每年提供灌区 2.7 亿 m^3 水量，水源较充足。灌区总土地面积 81.56 万亩，其中耕地面积 53.89 万亩，设计灌溉面积 32 万亩。灌区属温热半干旱农业气候区，春季多风少雨，蒸发量大；夏季温热多雨，空气湿润；秋季降温急骤，冬季漫长寒冷。年平均气温 3.2°C ，夏季最高气温 41.5°C ，冬季最低气温 -39°C ，多年平均降水量 420mm 左右，多年平均蒸发量 1485mm，最大冻深 2.2m。

江东灌区现有干渠 6 条，长 65.07km；分干渠、支渠 24 条，长 100.26km。已建设干渠防渗工程 30.524km，支渠防渗工程 7.116km，斗渠防渗 6.41km，干、支渠道衬砌率 22.77%。

(2) 渠道防渗防冻胀技术应用

江东灌区输水渠道多为填方渠道，渠道防渗主要采用混凝土板+全铺式复合土工膜料防渗型式。防渗顶高程为设计水位以上超高 50cm，边坡采用现浇混凝土板为保护层，护坡板横缝平行于设计堤顶，竖缝错开分缝，护坡板下设现浇混凝土齿墙固脚，齿墙顶高程与设计渠底齐平。为防止冻胀，坡面防渗体在复合土工膜下作 10 cm 砂垫层，齿墙下设 20 cm 砂垫层。现浇混凝土板之间及齿墙之间充填三毡。从近几年已实施的防渗效果来看，该种防渗防冻胀措施经济可行。

(3) 典型渠道（渠段）防渗防冻胀技术措施

灌区防渗主要是六干渠防渗，渠底土质为粘性土，渗漏很小，因此对渠底不采取防渗措施，只对渠坡进行防渗护砌。渠道防渗采用全铺式复合土工膜作为防渗材料，坡比 1: 2。防渗顶高程为设计水位以上超高 50cm。边坡采用现浇混凝土板为保护层，现浇混凝土板规格为 90 cm × 100 cm × 10 cm，不够此规格的板放在护坡最下端，护坡板横缝平行于设计堤顶，竖缝错开分缝。护坡板下铺 10cm 砂垫层，复合土工膜放于二者之间。护坡板下设现浇混凝土齿墙固脚，齿墙顶高程与设计渠底齐平，规格为 30 cm × 50 cm，每 5m 分缝，缝间充填三毡，

齿墙下设 50cm 砂垫层。

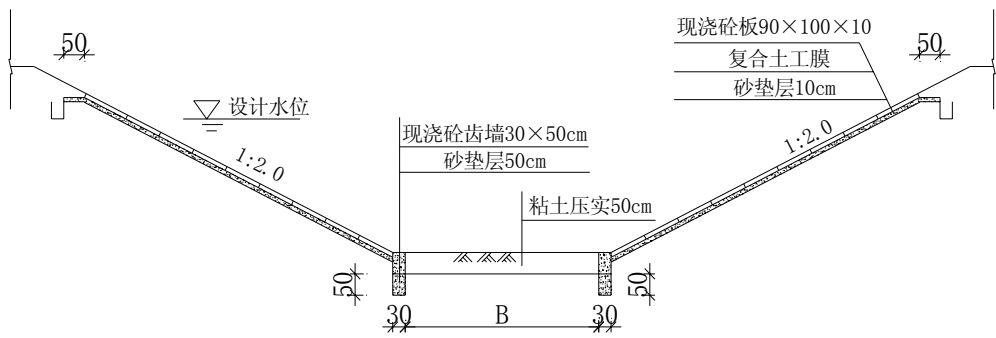


图 3-29 江东灌区六干渠防渗断面图



图 3-30 江东灌区六干渠照片

根据该区土质情况，渠坡复合土工膜采用单位面积 400g/m^2 ，膜厚 0.3mm ， 0.5Mpa 水压下不渗水的复合土工膜（PE 膜），接缝焊接长度不小于 10cm ，焊接强度不能低于复合土工膜本身强度。混凝土强度等级 C20，抗冻等级为 F150。抗冻混凝土必须使用有引气剂作用的外加剂，其质量应符合国家标准 GB8076-87《混凝土外加剂》的规定，抗冻混凝土配比应通过试验确定，水泥应选用硅酸盐水泥，水泥强度等级不应小于 32.5。砂垫层选用中粗砂，施工中要求洒水整平，用平板振捣器震实，密度达到中密以上。

（4）渠道防渗防冻胀技术应用效果

江东灌区到目前为止已完成 1999 至 2008 十个年度灌区续建配套与节水改造项目，各年度护砌渠段运行多年，衬砌渠道稳定性良好。从已实施的防渗效果来看，灌区采取的防渗防冻胀措施经济可行。防渗工程建设以前由于渠道土质不好，渠道两侧冲刷、渗漏严重。渠道防渗后，防渗、防冲效果较好，不仅解决了渠道

渗漏问题，而且提高渠道的输水能力，缩短输水时间，起到了防冲、减淤、防坍塌、稳定渠床以及保障输水安全的作用。从运行情况看，没有变形、沉陷等现象发生。

3.2.2.4 黑龙江悦来灌区

(1) 灌区概况

悦来灌区位于黑龙江省东部松花江下游右岸的桦川县境内，灌区灌溉用水由渠首泵站抽取松花江水供给，是黑龙江省已建大型抽水灌区之一，地理坐标为东经 $130^{\circ} 35' \sim 130^{\circ} 49'$ ，北纬 $46^{\circ} 51' \sim 47^{\circ} 07'$ ，总面积 41.47 万亩，耕地面积 36.28 万亩。该区属中温带大陆性季风气候区，多年平均降水量 498mm，春季干燥风大，气温回升快；夏季暂短，温热多雨；秋季气候凉爽，降温急骤；冬季严寒漫长。多年平均气温 2.6°C 左右，极端最低气温为 -41.1°C ，极端最高气温为 36°C ，冻土层深达 2.5m，冻结期在 7 个月左右。灌区现有干、支渠 12 条，支以上渠系建筑物 69 座。

(2) 渠道防渗防冻胀技术应用

悦来灌区渠道防渗有两种形式，即现浇混凝土板和预制混凝土板，都是采用梯形渠道。现浇混凝土板的冻胀技术措施为渠道整形夯实后铺 5cm 砂垫层，其上铺每平方米 400g 的复合土工膜，最后进行现浇混凝土，混凝土分缝有的采用 1cm 厚的浸沥青分缝板，有的现浇时用钢板隔开浇筑，待钢板拿出后既为一个缝。板块根据渠道的大小，采用 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 或 $1\text{m} \times 1.5\text{m}$ 的板块，小型农渠有的采用每 2 延长米 1 个施工缝进行分缝，浇筑时隔 2m 进行支模浇筑，待混凝土上强度后在进行堵空浇筑，之间的施工冷缝即为分缝。现浇混凝土形式经几年运行没有发现断裂、冻胀等现象，而且板缝中间不长草，比较平整光滑，感观较好。

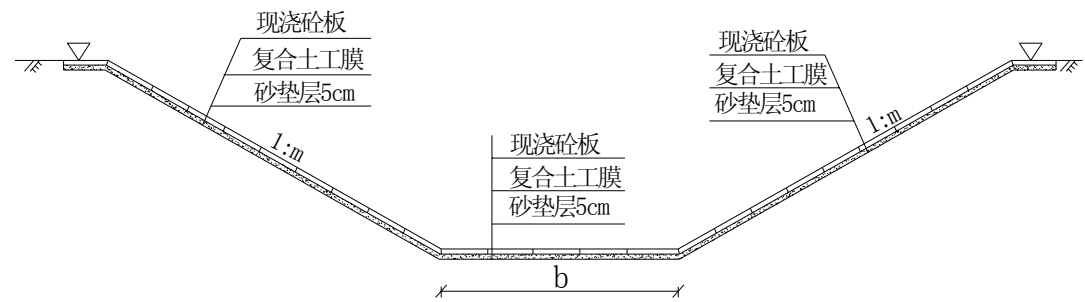


图 3-31 悦来灌区渠道防渗防冻胀形式之一

预制混凝土板多为 $50\text{cm} \times 50\text{cm} \times 8\text{cm}$ ，渠道整形夯实后铺每平方米 400g 的复合土工膜其上铺 5cm 砂垫层，然后进行铺板，这种形式也比较好，但在时间长了以后在板缝之间长出蒿草，感观上不如现浇混凝土。但现浇混凝土受工期限制，只能在灌区停水后进行，工期短。预制混凝土板可以在任何时间预制，灌区停后铺装，工期较长。

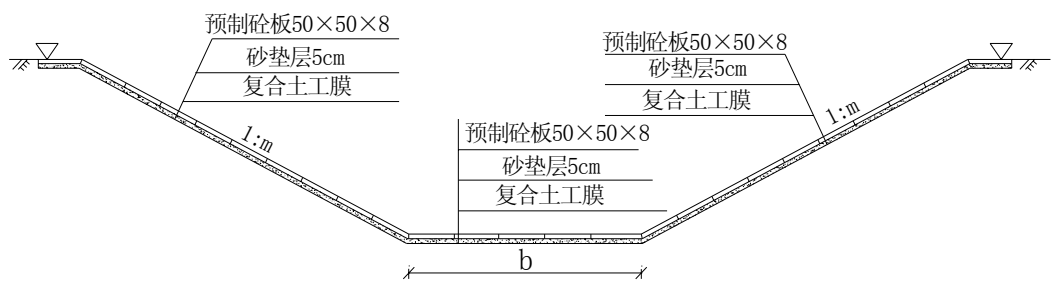


图 3-32 悦来灌区渠道防渗防冻胀形式之二

(3) 典型渠道（渠段）防渗防冻胀技术措施

西三支渠 $0+000-0+150$ 段为 8cm 现浇混凝土， 1cm 厚的浸沥青分缝板，板块采用 $1\text{m} \times 1.5\text{m}$ ，渠道整形夯实后铺 5cm 砂垫层，其上铺每平方米 400g 的防渗膜，最后进行现浇混凝土，为梯形渠道，底宽 4m ，边坡长 3m 。2006 年秋季施工到现在运行保持良好，没有发现冻胀现象。

西三支 $0+150-4+500$ 段为 8cm 厚预制混凝土板衬砌，渠道整形夯实后铺每平方米 400g 的防渗膜其上铺 5 厘米砂垫层，然后进行铺板，局部段由于当时施工土方压实不够出现塌陷，但整体还是较好。在板缝间长出杂草，感观上不如前一段好。

哈同公路北侧的农渠道采用 6cm 厚、每 2 延长米 1 个施工缝进行分缝，浇筑时隔 2m 进行支模浇筑，待混凝土上强度后在进行堵空浇筑，之间的施工冷缝即为分缝。在 2008 年秋季施工到现在，状况也是较好，出现几处断裂缝也是土方不实的原因。此处现浇灌混凝土每块板内加了 4mm 粗的冷拔丝钢筋网，冷拔丝间距为 30cm ，起到了防止断裂的作用。

3.2.2.5 黑龙江龙头桥灌区

(1) 灌区概况

龙头桥灌区位于黑龙江省三江平原腹地，地理坐标为北纬 $132^{\circ} 00'$ ~ 132

° 40'，东经 46° 15' ~ 46° 45'，灌区总面积 66.84 万亩，设计灌溉面积 43.10 万亩。灌区属于寒温带大陆季风气候区，多年平均降水量为 518mm，夏季高温多雨，冬季干冷而漫长。最高气温出现在 7 月份，极温为 36.6℃，最低气温出现在 1 月份，极温为 -37.2℃。冬季结冰期长达 150d ~ 180d，最大冻深可达 2.53m。

灌区内渠道沿线地形平缓,地貌属高漫滩。局部有冲沟、泡沼等地貌。青山总干渠段地表岩性为高液限粘土和级配不良粗砂,表层粘性土仅局部分布,岩性以粗砂为主。粗砂层渗透性好,分布连续,地下水埋深在 1.5~3.6m,因此成渠条件较差,渠道过水必将产生渗漏,必须作防渗处理。

(2) 典型渠道(渠段)防渗防冻胀技术措施

龙头桥灌区青山总干渠长 5065m, 渠道防渗衬砌形式为梯形断面半铺全防的复合防渗衬砌结构。即边坡、渠底全部铺重量为 400g/m^2 二布一膜复合土工膜防渗, 边坡为 $50\text{cm} \times 75\text{cm} \times 10\text{cm}$ 预制混凝土板, 预制板下铺 5cm 厚砂垫层。渠底为复合土工膜上加 50cm 回填土, 坡脚设梯形混凝土固脚。

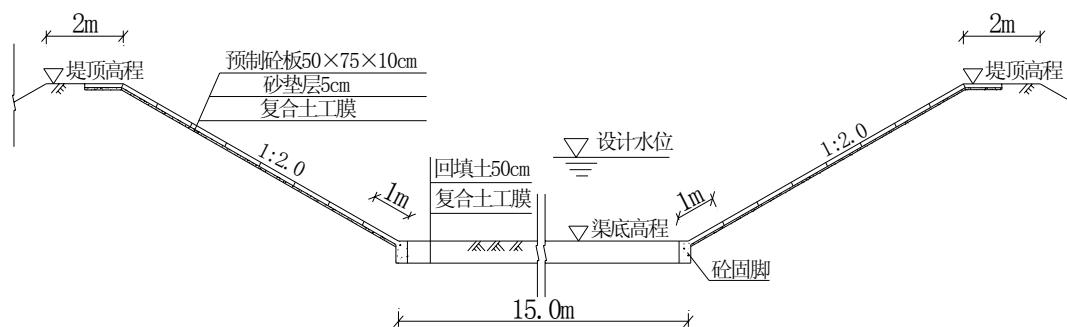


图 3-33 青山总干渠横断面图

(3) 渠道防渗防冻胀技术应用效果

青山总干渠典型工程渠道防渗于 2005 年建成，除个别渠段因渠基施工质量没掌握好而有一、二处小面积塌陷外（已及时维修好），其余渠道至今仍运行很好，没有冻胀破坏现象。从运行效果看，以下几点是致使渠道工程运行良好的重要因素：

1) 合理选用混凝土防护板形式

目前,渠道防渗衬砌结构一般都是采用混凝土板防护、复合土工膜防渗钢柔结合的结构措施,混凝土防护板可以是现浇或预制。对于填方渠道、地质条件又较好的情况下,不宜产生冻胀破坏,可以选择直接现浇混凝土板。而当渠道处于

高地下水位又是挖方渠段、或冻胀性土渠基的填方渠道时，一定要选用预制混凝土板作为防护板。预制板的应用不但可以提高施工速度，而且可以保证混凝土的质量。同时，混凝土预制板可以适应渠基产生的冻胀变形，当冻融消失时，预制板也基本复原，不会象现浇的大块混凝土板那样产生冻胀裂纹甚至断裂。如果预制板破损了，因为块小也便于维修。混凝土预制板的完好无损，也就保证了防渗衬砌结构的整体完好性，达到渠道防渗放冻胀的效果，延长渠道工程使用寿命。

如青山总干渠道大多为挖方渠道，且渠底宽又在七米以上，因此设计采用边坡为 $50\text{cm} \times 75\text{cm} \times 10\text{cm}$ 预制混凝土板衬砌。施工时为了加快施工进度，提高混凝土预制板的产量，也为了保证预制板的质量，共分四个工地进行预制板的生产加工，每天四个工地可生产标号为 C20、F200 的 5000 块预制板以供渠道工程使用。因此，混凝土预制板的应用是青山总干渠运行良好的主要原因。

2) 坡脚与齿墙的连接

为了防止坡脚混凝土预制板下滑，经过请示批准，把原设计略有改动。在浇筑坡脚下方混凝土齿墙时，同时沿渠坡方向向上一米也现场浇筑厚 10cm 的混凝土，并与齿墙连接一体。这样坡脚和齿墙就形成了一个连续的整体，增强了坡脚渠基的稳定性，也防止了渠坡混凝土块的下滑。事实证明，这种施工方法确实解决了以往渠坡坡脚混凝土块下滑的问题，保证了渠道工程的整体连续性，也是促使渠道工程能良好运行的主要因素。

3) 防渗防冻胀结构选择

青山总干渠道防渗衬砌形式为梯形断面半铺全防的复合防渗衬砌结构。即边坡、渠底全部铺重量为 400g/m^2 二布一膜复合土工膜防渗，边坡为预制混凝土板防护，预制板下铺 5cm 厚砂垫层，起到保护防渗膜和使预制板平整的作用，渠底为复合土工膜上加 50cm 厚回填土，即保护了防渗膜又不怕渠基冻胀。采用这种防渗防冻胀结构措施，不但节省工程投资还可以提高渠道防冻胀能力，延长了工程使用寿命，是最经济合理的渠道防渗防冻胀工程结构措施。

3.2.3 华北地区

3.2.3.1 内蒙古河套灌区

(1) 灌区概况

河套灌区位于内蒙古自治区西部、黄河上中游内蒙古段的北岸冲积平原，地

理坐标为北纬 $40^{\circ} 19' \sim 41^{\circ} 18'$ ，东经 $106^{\circ} 20' \sim 109^{\circ} 19'$ ，灌区总面积 1679 万亩，现灌溉面积 861 万亩，是我国最大的一首制自流引黄灌溉区和全国三个特大型灌区之一。河套灌区地处大陆性干旱、半干旱气候带，具有显著大陆性气候特征。冬季严寒少雪，夏季高温干热，降雨量少，蒸发量大，干燥多风、日温差大、日照时间长，无霜期短，土壤封冻期长，属于无灌溉即无农业地区。灌区年降水量 139~222mm，年蒸发量 1999~2346mm，年平均气温 $6 \sim 8^{\circ}\text{C}$ ，年封冻期 5~6 个月，最大冻结深度 1.0~1.3m。

河套灌区的水资源主要是过境的黄河水。黄河水量丰富，年均过境径流量约 296.9 亿 m^3 ，水质优良，为 HC03-Ca 型，矿化度 $<1\text{g/L}$ 的优质淡水。自从 1961 年在黄河上建成三盛公拦河闸和总干渠引水枢纽工程以后，灌区相继建成了总干渠、干渠、分干渠、支渠、斗渠、农渠、毛渠等七级输配水灌溉系统和相应的排水系统。

灌区地下水动态受气象因素和引黄灌溉的影响，表现出明显的季节性周期动态变化。根据多年动态观测资料，全灌区枯水期水位埋深在 2.03~2.64 m，丰水期水位埋深在 0.93~1.20 m，多年平均水位埋深在 1.65~1.71 m，多年平均水位变幅在 1.01~1.49 m。河套灌区上部地层为第四系全新统，根据岩性特征可分为上下两组，上部岩性以砂壤土、壤土和粘土为主，下部岩性为粉砂、细砂，局部为中砂，具典型的上细下粗二元结构。

截至 2009 年，通过大型灌区续建配套与节水改造，河套灌区已在杨家河、义和、永济、长济、东风分干渠等 19 条支渠以上骨干渠道上实施渠道衬砌防渗工程改造 145.01km。

（2）河套灌区渠道防渗防冻胀的必要性

1) 河套灌区所属区域的特点决定了灌区渠道衬砌工程必须采取防冻胀技术措施。

① 气候特点。内蒙古河套灌区地理位置为北纬 $40^{\circ}12' \sim 41^{\circ}20'$ ，东经 $106^{\circ}10' \sim 109^{\circ}30'$ 之间，属季节性冻土区。据当地气象资料，河套灌区多年平均气温 7.0°C ，冻结指数（负积温）在 600~1100 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ ，土壤冻结期一般从 11 月中旬开始，至翌年 4 月下旬融通，冻结深度 80~140cm 左右。形成了渠道基土产生冻胀的气候条件。

② 土质特点。据内蒙古水文地质大队勘探资料，河套灌区 2.5m 深包气带范围内以重粉质壤土和重粉质砂壤土为主，粉粘粒（粒径 $< 0.05\text{mm}$ ）含量都在 65% 以上，属于强冻胀性土质。

③ 地下水的特点。灌溉引水量直接影响地下水位的涨落，影响了土壤含水率高低。每年 9 月下旬至 11 月上旬的秋浇是河套灌区必要的一次储墒灌水，此时灌区地下水位最高（埋深最浅），灌区地下水平均埋深在 50 ~ 100cm 左右，因此造成灌区土壤含水率较高，土层 20cm 以下的土壤含水率都在 25% 左右，超过了土壤起始冻胀含水率。在冻结过程中，地下水位与冻结锋面几乎同步下降，从下层土壤向冻结锋面的水分迁移非常明显，为土壤产生强冻胀提供了水分条件。

河套灌区区域性的特点，同时具备了使土壤产生冻胀的温度、土质、水分条件，冻胀敏感性的土壤在水热耦合共同作用下形成了强冻胀区域。

2) 研究成果证实了灌区渠道衬砌工程必须采取防冻胀设计

为揭示河套灌区区域性冻胀规律，探讨河套灌区适宜的渠道衬砌结构形式，自 1987 年起，河套灌区管理总局及内蒙古水利科学研究院等单位对灌区冻胀规律、各级渠道适宜的渠道衬砌结构形式及防冻胀措施进行了长期系统的观测及研究，主要观测成果有：

① 在 1991 ~ 1994 年完成了“河套灌区季节冻土区域冻胀规律及其冻胀分类研究”，其中对不同地下水埋深条件下地表冻胀量进行了测试：当地下水埋深在 0 ~ 50cm 时，地表冻胀量达到了 15 ~ 17cm。

② 在 1999 ~ 2001 年完成了“内蒙古河套灌区节水改造工程综合节水技术试验与示范研究”，在 2002 ~ 2004 年完成了内蒙古河套灌区节水改造综合技术试验监测与示范推广”项目，分别在杨家河干渠、永刚分干渠、西济支渠的衬砌段落建立了冻胀观测试验场，重点研究了不同级别、不同走向的衬砌渠道采取保温防冻胀的方案。试验进行了三个冻融周期的观测，其中未采取保温措施的试验段主要观测成果如下：

杨家河干渠为南北走向，渠道阴、阳坡不明显，但渠道不均匀冻胀强烈，阴坡最大冻胀量为 25.9cm，阳坡最大冻胀量为 10.2cm，封顶板最大冻胀量为 11.9cm。

永刚分干渠为东西走向，渠道阴、阳坡明显。在三个冻融周期的观测中，渠

底最大冻胀量达到 21.9cm，阴坡最大冻胀量为 13cm，阳坡最大冻胀量为 4.6cm，阴坡齿墙最大冻胀量为 11cm，阳坡齿墙最大冻胀量为 4.2cm。

西济支渠为南北走向，渠道阴、阳坡不明显。在三个冻融周期的观测中，渠底最大冻胀量达到 16.4cm，阴坡最大冻胀量为 8.9cm，阳坡最大冻胀量为 8.6cm。

由以上观测成果可见，未采取保温措施处理的衬砌渠道都发生了很大的冻胀变形，而且在渠道基土消融后，都不能完全复位，甚至存在较大的残余变形。这些试验段经过几个冻融周期冻胀和融沉交替，已经产生了边坡塌陷、滑坡等现象。然而，在采取了不同厚度保温措施处理后的试验段落，平均每厘米厚保温板（密度为 20kg/m^3 ），可提高基土温度 $0.7\sim 1.8^\circ\text{C}$ ，减少冻深 5~11cm。渠道冻胀量得到大幅度的削减或已完全消除，衬砌渠道未受冻胀破坏。由试验数据建议：在河套灌区，东西走向的衬砌渠道上阴坡保温板的厚度不宜小于 10cm，阳坡保温板的厚度不宜小于 5cm。在南北走向的衬砌渠道上阴、阳坡不明显，保温板的厚度宜在 8cm 左右。

大量研究成果及近年实施的节水改造工程（有保温措施）表明：在河套灌区衬砌渠道中采用聚苯乙烯保温板防止渠道冻胀是非常必要的，效果非常明显，与换填风积砂等其他防冻胀措施相比，效益费用比最合理。

（3）渠道防渗防冻胀技术应用

1）渠道防渗结构形式

灌区渠道衬砌段采用全断面聚乙烯膜防渗，全断面混凝土预制板做保护层。这种结构形式防渗效果好，渠道输水糙率较小，施工简单。

渠道衬砌防渗层采用全断面铺设 0.3mm 厚聚乙烯膜料，膜上采用 $40\text{cm} \times 60\text{cm} \times 6\text{cm}$ 或 $50\text{cm} \times 70\text{cm} \times 8\text{cm}$ 长方形混凝土预制板和弧形底混凝土预制板做保护层，混凝土预制板的强度等级为 C25，抗冻等级不小于 F200；混凝土预制板与膜料之间设 3cm 厚 M10 砂浆过渡层，混凝土预制板铺砌的砌筑缝宽为 2.5cm，用 M15 水泥砂浆勾缝。

封顶板采用与坡面顶层预制为整体的 C25 混凝土预制构件，并且将膜料从封顶板向外延伸 0.3m，封顶板外侧设路缘。

2）渠道防冻胀结构形式

灌区节水改造工程骨干渠道选用聚苯乙烯保温板做为保温材料，它具有自重

轻，强度高，吸水性能低，隔热性能好，运输、施工方便且削减冻深和冻胀效果好等优点。根据灌区渠道防渗衬砌工程抗冻胀试验观测，采用聚苯乙烯保温板防冻保温，能够满足渠道衬砌工程的抗冻胀要求。保温板厚度阴坡为 8~10cm，阳坡为 6~8cm。

田间渠道采用换填风积砂的保温措施，风积砂换填厚度 20~30cm。

(4) 典型渠道（渠段）防渗防冻胀技术措施

<1>聚苯乙烯保温板在衬砌渠道防冻胀中的应用

1) 典型应用渠道的基本情况

永刚分干渠为东西走向的宽浅式梯形断面渠道，全长 35km，入口设计流量为 20m³/s，1999 年随着永刚分干渠建筑物续建配套与节水改造示范工程的实施，在永刚分干渠二闸上完成渠道衬砌 8.8km，2000 年农业综合开发骨干工程项目又在永刚分干二闸以下完成了 4.0km 的混凝土渠道衬砌。

西济支渠为南北走向的梯形断面和梯形断面弧形坡脚渠道，全长为 9.45km，引水口设计流量为 5.74m³/s，控制灌溉面积 2 887hm²。西济支渠灌域共有斗渠 7 条，总长度为 20.63km，斗渠多为东西走向，设计流量在 0.72~1.81m³/s 之间。1999 年随着隆胜节水示范区的建设，西济支渠及其灌域内的斗农渠全部进行了渠道衬砌。

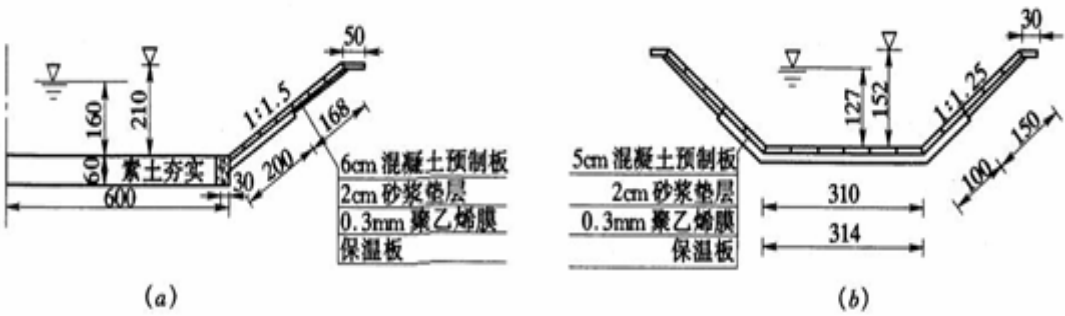


图 3-34 聚苯乙烯保温板衬砌渠道横断面图（单位：cm）

(a) 永刚分干渠；(b) 西济支渠

2) 聚苯乙烯板材料性能和保温机理

① 聚苯乙烯板材性能

聚苯乙烯（EPS）是由聚苯乙烯聚合物为原料加入发泡添加剂聚合而成，属超轻型土工合成材料。它是无色、无嗅、无味而且有光泽的透明固体。具有重量

轻、导热系数低、吸水率很小、化学稳定性强、抗老化能力高、耐久性好、自立性好、施工中易于搬动等优点，缺点是耐热性低。试验采用的聚苯乙烯板物理力学性能和《渠系工程抗冻胀设计规范》（SL23-2006）要求性能见表 2。

表 2 聚苯乙烯板物理力学性能

项目	密度 (kg/m ³)	导热系数 W/(m·k)	吸水率(体积) (%)	尺寸稳定性 (%)	压缩强度 (相对变形) (kpa)	弯曲变形 (mm)
采用的测试值	20	0.035	2.1	4	240	25
规范指标	≥15	≤0.041	≤6	≤4	≥60	≥20

②聚苯乙烯板保温机理

一般渠道，基土冻结并能产生冻胀需具备的基本因素有：基土具有冻胀敏感性，基土有相应的冻结环境，基土中含有一定的孔隙水，并且三者缺一不可。因此只要控制其中任意一个因素便可实现削减或消除土体冻胀的目的。衬砌渠道采用聚苯乙烯保温措施，就是利用保温材料导热系数低的性能改变和控制渠道衬砌基土周围热量的输入、输出及转化过程，人为地影响冻土结构，使冻土内部的水热耦合作用在时间和空间上向不利于冻胀的方向发展变化。具体表现在：提高冻结区的地温；推延冻结的进程，减缓冻结速率以削减冻深；减少水分迁移量，降低冻土中的冰含量；削减冻胀量。

3) 聚苯乙烯保温板应用效果评价

河套灌区针对所在区域属于季节性冻土地区，渠道冻胀破坏严重的实际，近 10 年来在骨干渠道防渗衬砌工程建设上推广使用聚苯乙烯保温板技术，大大提高了渠道的使用寿命，达到了“防渗、抗冻、经济、可行”目的。



图 3-35 永刚分干渠渠坡采用聚苯乙烯保温板防冻措施



图 3-36 西济支渠聚苯乙烯保温板铺设



图 3-37 永济干渠采用全断面聚乙烯膜防渗，聚苯保温板防冻

①聚苯乙烯保温板提高基土地温显著，这是由于保温板保温隔热作用，可有效减缓基土与外界的热交换速度，使基土在冻结过程中温度速率降低缓解，板愈厚表现愈明显。适宜板厚与渠道走向、坡面、上下部位有关。在试验条件下，东西走向渠道阴坡上部铺设 5cm，下部铺设 8cm 厚保温板时，基土不出现负温；阳坡上、下部均铺设 3cm 厚保温板可基本消除负温。南北走向渠道由于阴、阳坡及上、下部位温差小，均铺设 4cm 厚保温板可消除负温。保温板保温能力受环境影响较大，即同一厚度保温板在不同部位其保温效果不同，保温板每厘米厚提高基土温度在阴坡上、下部分别为 1.8℃、1.3℃；在阳坡为 0.7℃。

②保温板可明显减小基土冻深，这是由于保温板导热系数低，能有效缓解冻结速率，抑制冻深发展。随着板厚增加，冻深呈线性规律减少。在试验条件下，每厘米厚保温板对冻深减少值与渠道走向和部位有关，东西走向渠道阴坡上、下部分别为 11.3cm、6.8cm；阳坡上、下部分别为 11.7cm、5.0cm。南北走向渠道

阴坡上、下部分别为 10.4cm、9.5cm；阳坡上、下部分别为 9.5cm、6.9cm。不同厚度保温板冻深削减率和渠道走向部位有关。东西走向渠道削减率阴坡上部 4cm 厚板、下部 5cm 厚板分别为 44.0%、48.7%；阳坡上部 3cm 厚板、下部 5cm 厚板分别为 68.3%、56.7%。南北走向渠道削减率阴坡上部 4cm 厚板，下部 5cm 厚板分别为 43.7%、66.7%；阳坡上、下部均为 3cm 厚板分别为 39.0%、50.7%。

③保温板能够抑制基土水分变化，这是由于铺设保温板后，冻结锋面推进变缓，基土温度梯度较小，水分迁移及原驻水重分布的能力较弱，使冻结过程中冻结锋面与地下水的距离逐渐加大，水分迁移路径相对增大，不利于水分迁移，而有利于减少冻胀。

④保温板对基土冻胀有明显的抑制作用，能减小冻胀量。对冻胀削减量和渠道走向、部位有关。东西走向渠道阴坡上部铺设 3cm、4cm、5cm 厚保温板可削减冻胀量 52%、97%、100%；阴坡中部铺设 5cm、8cm、10cm 保温板可削减冻胀量 39%、72%、82%；阳坡上下均铺设 3cm 厚保温板可基本消除冻胀量。南北走向渠道阴、阳坡上部铺设 4cm、下部铺设 5cm 厚保温板可基本消除冻胀量；渠底铺设 5cm 厚保温板可削减冻胀量 88%；渠底铺设 8cm 厚保温板可完全消除冻胀量。

据试验结论：东面走向渠道阴坡上部铺设 3cm、4cm、5cm 厚保温板可削减冻胀量 52%、97%、100%；阴坡中部铺设 5cm、8cm、10cm 保温板可削减冻胀量 39%、72%、82%。阳坡上下均铺设 3cm 厚保温板可基本消除冻胀量。南北走向渠道阴、阳坡上部铺设 4cm、下部铺设 5cm 厚保温板可基本消除冻胀量，渠底铺设 5cm 厚保温板可削减冻胀量 92.5%；渠底铺设 8cm 厚保温板可完全消除冻胀量。

<2>换填风积沙在渠道衬砌防冻胀中的应用

1) 风积砂特性

利用不冻胀性土换填冻胀性基土，是防冻胀普遍采用的一种有效措施，换填料一般采用粗砂、砾石等。为了能取得更多的料源，我们试用了风积砂，风积砂在我区分布极广。主要地区有阿拉善盟、鄂尔多斯市、巴彦淖尔盟、通辽市和赤峰市等，它的运用成功，为我区渠道防冻开辟一个广大的料源。这次试验采用了赤峰市宁城县巴里营子老哈河畔风积砂。对它进行了室内、模拟渠道和现场应用

3 种试验，均较理想。风积砂属于岩石风化产物，受风力搬运、堆积而成。其特点是颗粒均匀，粉粘粒含量极微，渗透性能好。

经取风积砂料试验，其颗粒组成和物理指标见表 3。从表可见，颗粒中以 0.10mm 以上粒径含量为主，约占 75%，无粘性颗粒、粉粒含量较少，属于极细砂，对防止冻胀是较为有利的。

表 3 风积砂颗粒组成和物理指标

颗粒组成 (%)					土的分类	比重	干密度 (g/cm ³)	孔隙比	孔隙率 (%)	不均匀系数	曲率系数	毛细管水上升高度 (cm)
2.0~0.5mm	0.5~0.25mm	0.25~0.10mm	0.10~0.05mm	0.05~0.005mm								
1.0	33.1	39.8	19.8	6.3	极细砂	2.67	1.50	0.77	43.4	2.68	1.25	41.4

2) 换填设计处理

共设计了 8 种换填处理，分别在试验场模拟渠道及马架梁渠道上进行试验。模拟渠道按超过最大冻深以内更换基土，更换基土下部设 40cm 厚砂砾石层，以保证地下水连通。模拟渠道与原基土之间及不同处理之间皆用塑料薄膜隔开，以分别控制不同地下水位。回填基土按干密度 1.40g/cm³ 控制。马架梁渠道基土保持原状态。试验段总长度为 59m。8 种处理分别在 4 种地下水位（离渠底高低为 40、60、140、-80cm），2 种基土（轻粉质壤土与粉质粘土）条件下进行，换填型式分为全断面等厚度换填与不等厚度换填两种。换填设计处理见表 3，处理 T11、T12 横断面见图 3-38、图 3-39。

表 4 风积砂换填设计处理

类别	地点	处理	换填厚度 (cm)			下卧土层	地下水位 (cm)	试验段长度 (cm)	渠道走向
			阳坡	渠底	阴坡				
模拟试验	二渠	T12	40	40	40	粉质壤土	140~40	3	SW45°
		T13	70	70	70	粉质壤土	140~40	3	SW45°
		T8	140	140	140	粉质壤土	140~40	3.5	SW45°

	三渠	T12	60	60	60	粉质壤土	60	3	SW45°
		T13	90	90	90	粉质壤土	60	3	SW45°
		T8	140	140	140	粉质壤土	60	3.5	SW45°
应用 试验	马架梁 渠 道	T10	50~70	0	60~80	粉质粘土	-80	20	NE40°
		T11	80~100	0	90~110	粉质粘土	-80	20	NE40°
合 计		8						59	

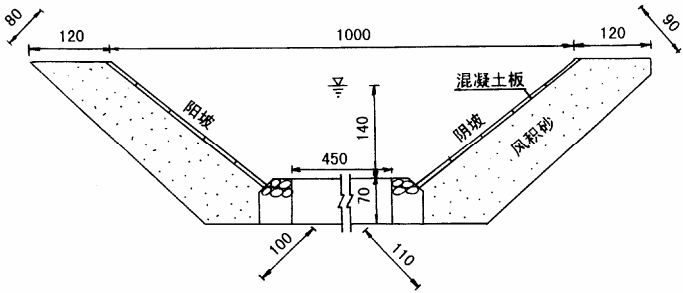


图 3-38 马架梁渠道处理 T11 横断面 （单位：cm）

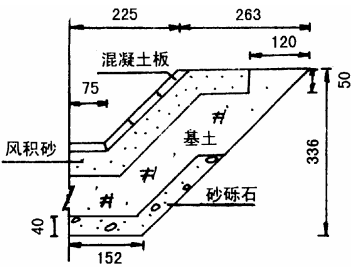


图 3-39 模拟渠道三渠处理 T12 横断面 （单位：cm）

3) 效果分析

- ①风积砂属弱冻胀性土壤，是一种较好的防冻材料。实测换填层内冻胀率在 3%以下，防冻效果在 90%以上。可用于基土最大冻胀量为 260mm 地区，使冻胀量控制在 30mm 左右，冻胀率在 3%以下，防冻效果在 90%以上。
- ②在冻结过程中风积砂垫层中饱和水份向与冻结面相反方向转移，故换填层内含水量大小对冻胀的影响甚微。地下水埋深不宜小于 60cm。
- ③风积砂的防冻效果随换填厚度的增加而增加，换填率为 70%左右时，效果好、造价低，再增加厚度，效果增加不大。
- ④风积砂颗粒组成中大于 0.1mm 颗粒愈多其冻胀性愈小，因砂土开敞冻胀性随粉粒含量增大而增加，因而应尽量减少粉粒含量，但从实测结果看，当粉粒含量为 6%时，仍无大的影响，因而不宜大于此数。

⑤渠道两坡宜采取不等厚换填（上部小、下部大），当地下水位及土质条件不同时，其不同部位换填率可分别按以下取值：

1.地下水位埋深在渠底以下 40～60cm，土质为壤土、轻、中粉质壤土时，阳坡上、下部位换填率可采用 45%～70%，阴坡可采用 50%～80%，渠底采用 80%。

2.地下水位埋深在渠底以上 50～100cm，两坡有出逸水，土质为粉质粘土、粘土、重粉质壤土时，阳坡上、下部位换填率取 80%～100%，阴坡采用 75%～90%，渠底采用 100%。

若当地下水位、水质条件与上述不同时，可根据当地条件，对上述取值进行修改，一般均可取得较好的防冻效果。

<3>土壤固化剂在渠道衬砌防冻胀中的应用

1) 渠道设计

采用梯形断面，采用 0.3mm 厚聚乙烯膜防渗，5cm 厚预制固化板做保护层，板下设 3cm 厚固化泥过度层，结构形式见图 3-40。

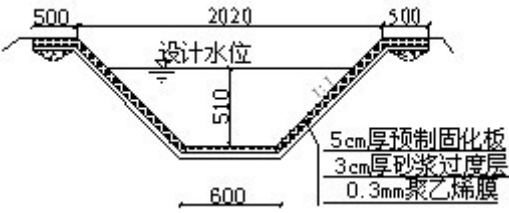


图 3-40

2) 土壤固化剂的原理及技术指标

土壤固化剂是在常温下能直接胶接土体中土壤颗粒表面或能够与粘土矿物反映生成胶凝物质的硬化剂。

①原理

固化剂属于水化类固化剂，主要由石灰石、粘土、石膏等矿物再加入不同化学元素，经过一定工艺加工而成为固体粉状物质。土壤固化剂按一定比例掺入土壤，加水拌和，然后经过碾压或振压，在碾压或振压时，将拌合物中气体水分逐出，土壤固化剂与土壤发生凝胶化，使土壤颗粒结构增强了相互粘聚力，使其形成相当抗压强度和抗渗能力的砌块。

②技术指标

技术指标：土壤固化剂固化剂技术指标见表 5

表 5 土壤固化剂技术指标

序号	检测项目	技术指标	检测标准
1	渗透系数(cm/s)	$<6 \times 10^{-8}$	标准试块在室内自然条件下养护 28 天
2	干密度 (g/m^3)	1.75~1.86	
3	抗压强度 (Mpa)	7.15~12.17	
4	初凝(小时)	6	
5	终凝(小时)	16	



图 3-41 公安斗渠土壤固化板施工与灌溉运行（2007 年）



图 3-42 隆胜节水示范区西济渠右五斗渠土壤固化板+塑膜衬砌（1999 年施工）

③ 应用效果分析

1. 固化土衬砌渠道可预制或现浇。预制：筛土—加固化剂—拌合—加水拌合—机械加压—养护—搬运—铺砌安装。现浇：将湿拌均匀的固化土拌合料均匀地铺撒到已清好的地基表面，铺撒厚度 8~10cm，将表面摊平整后，碾压须 3 遍以上，压实干密度不得小于 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ 。

2. 采用土壤固化剂预制板衬砌渠道，设计断面为梯形断面，采用 0.3mm 厚聚苯乙烯膜防渗，5cm 厚预制固化板护面，板下设 3cm 厚固化泥过度层，边坡系

数 1: 1。

3.衬砌渠道冻胀变形较均匀，消融后自然复位，整个坡面无隆起或沉陷破坏现象。对比测试结论表明：固化土预制块与混凝土预制块衬砌的渠道的冻结、冻胀规律基本相同，因此，在冻胀量较小的田间渠道可选用固化土预制块衬砌，渠道断面宜采用梯形。将固化土加工制成预制板衬砌渠道可就地取材，节省大量砂石料，预制固化板是预制混凝土板造价的 65.1%左右。即可降低生产成本 34.9%。

<4>膨润土防水毯在衬砌渠道防冻胀中的应用

1) 渠道设计

公安斗渠右四农渠设计采用膨润土防水毯弧形底梯形断面形式，防渗毯厚 5mm，其上 10mm 厚砂浆保护。衬砌结构形式见图 3-43。

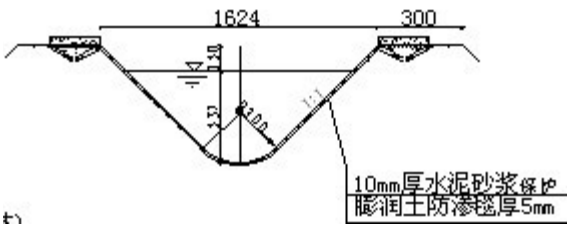


图 3-43 膨润土衬砌渠道结构形式

2) 膨润防水毯原理及技术指标

原理：膨润土属蒙脱石矿物质，粒径微小，是一种遇水膨胀失水收缩的物质，自由膨胀率 80%—360%。遇水膨胀后渗透系数很小，可作为一种廉价的防渗材料用于渠道的防渗。

膨润土防水毯（GCL）是一种新型的土工合成材料。它是将级配后的膨润土颗粒均匀混合后，经特殊的针刺工艺及设备，把高膨胀性的膨润土颗粒均匀牢固地固定在两层土工布之间，而制成柔性膨润土防水毯材料，既具有土工材料的全部特性，又具有优异的防水防渗性能，它能在拉伸、局部下陷、干湿循环和冻融循环等情况下，保持极低的透水性，同时还具有施工简易、成本低、节省工期等优点。

技术指标：膨润土防水毯技术指标见表 6

表 6 膨润土防水毯技术指标

序号	检测项目	技术指标	检测标准
1	膨胀系数（ml/2g）	≥24	ASTM-D5890

2	含水量 (%)	≤ 12	ASTM-D4643
3	流体损耗 (ml)	≤ 18	ASTM-D5891
4	抗拉强度 (N)	≥ 400	ASTM-D4632
5	剥离强度 (N)	≥ 75	ASTM-D4632
6	单位面积膨润土质量 (g/m^2)	> 500	
7	渗透性 (cm/s)	$< 5 \times 10^{-9}$	ASTM-D50874
8	指示流量 ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	$< 5 \times 10^{-8}$	ASTM-D5887



图 3-44 永刚分干渠膨润土防水毯



图 3-45 农渠膨润土防水毯衬砌施工与灌溉运行（2007 年）

3) 应用效果分析

①防渗效果：在试验条件下，田间渠道采用膨润土防水毯衬砌，平均渗漏强度为 $11.54 (\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ，与未衬砌渠道平均渗漏强度 $21.9 (\text{L}/\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 相比较，每平方米 1 小时减渗漏损失 10.36 升，即每平方米 1 小时可减少渗漏损失 47.3%，则提高水的净利用率 52.7%。

②渗漏历时与渗漏强度关系：通过渗漏历时与渗漏强度的拟合曲线表明：衬砌前（土渠）随时间的增加渗漏强度呈幂函数减小趋势；衬砌后（膨润土防水毯衬砌）随时间的增加渗漏强度呈自然对数函数逐渐减小趋势。

③在季节冻土地区，采用膨润土防水毯衬砌渠道，分干渠阴、阳坡最大冻深

分别为 98.5cm、44.0cm；农渠阴、阳破最大冻深分别为 94.1cm 和 80cm，由此可见分干渠阴阳坡冻深差异较大，而农渠阴阳坡冻深差异较小。

④观测资料表明：阴坡分干渠和农渠最大冻胀量分别为 13.4cm、5.8cm，；阳破最大冻胀量分别为 6.2cm 和 5.6cm，与以前年度无措施衬砌渠道平均最大冻胀量相比较，铺设膨润土防水毯渠道的边坡冻胀量并没有消减或消减较小，但是冻土融通后渠坡没有明显的残余变形量，复位很好，由此说明膨润土防水毯具有较好的柔性，适应变形的能力很强，整体性好。也说明膨润土处理可减小冻胀造成的不均匀性，增强渠道坡面的稳定性。

⑤按右四农渠衬砌 680m 长度计算，采用膨润土防水毯衬砌造价为 71582 元，每延米长度衬砌价格为 105.3 元；采用预制混凝土板衬砌造价为 100850 元，每延米长度衬砌价格为 148.3 元。两者进行比较，膨润土防水毯衬砌是预制混凝土板衬砌造价的 71.1%左右。说明采用膨润土防水毯与预制砼板保温防冻衬砌相比较分析，成本方面：减少了防渗膜、保温板与过渡层等材料及工序，可节约成本 29.1%；工期方面：膨润土防水毯用于渠道防渗具有施工简单，表现在地基要求低，施工速度快，与采用混凝土板衬砌相比，工期短，可大大减少施工时间，工期缩短 30%-50%以上。

（5）渠道防渗防冻胀技术应用的体会和经验

1998 年，首次进行永刚分干渠试验性衬砌，采用外地经验采用宽浅式无防冻措施进行衬砌，出现了较严重的淤积和冻胀破坏。从 1999 年的节水改造项目开始，设计时，管理部门先提出不同段落和不同灌溉条件的运行指标调整方案，再由设计单位、建设单位和管理单位共同确定断面、流速、纵坡、糙率等主要水力要素，优化设计指标；针对灌区所处的特殊地理位置、气候、地质和工程条件，根据阴阳面温差，经试验研究，在设计中采取不同厚度的保温板保温，以防止衬砌工程冻胀破坏；对部分渠段地下渠、半地下渠产生的扬压力，则采取了相应的排水措施，均取得了较好效果。同时，在杨家河干渠进行了 23 种不同结构形式的试验，为抗冻胀设计和结构设计及最优性价比提供了科学依据。通过大量实践，有以下一些体会和经验。

①聚苯乙烯保温板在水中长期使用过程中，可能存在导温系数增大、保温能力降低的不利因素，在灌区渠道衬砌工程中，如果条件许可，可采用聚氨脂保

温板，一来材料使用寿命延长，二来材料保温性能好。

② 据有关资料，聚苯乙烯保温板厚度达到 10cm 以上后，需对防渗衬砌渠道进行抗浮稳定计算。

③ 支、斗渠级渠道，如冻胀量较小，宜采用灌区常采用的弧形渠底衬砌结构。换填风积砂可考虑只换填渠道两侧 20~30cm，渠道底部可不考虑换填。

④ 对不同走向、位置、水文地质条件的渠道要有针对性的设计保温板厚度及铺设方法。

⑤ 对地下渠道进行保温设计时，应考虑地下水的测渗压力和浮托力对渠道边坡保温板的作用，以免保温板和砼预制板被浮起，破坏边坡稳定性。

⑥ 灌区骨干渠道防渗衬砌还宜采用实用于灌区的结构形式如现浇钢筋砼等形式。在中小型渠道上还可考虑土壤固化剂等防渗材料。



图 3-46 杨家和干渠未采取保温措施的试验段冻胀破坏情况



图 3-47 杨家和干渠采取保温措施的试验段

3.2.3.2 河北石津灌区

(1) 灌区概况

石津灌区位于地理位置处在北纬 $37^{\circ} 30' \sim 38^{\circ} 18'$ 和东经 $114^{\circ} 19' \sim 116^{\circ} 30'$ ，位于滹沱河与滏阳河之间，地貌类型可分为山麓平原、倾斜平原和冲积平原三个较大的地貌单元。灌区属温带大陆性季风气候区，多年平均降水量为 507.2mm，年最大冻土深 47cm。气象条件适宜冬小麦、玉米、棉花等多种农作物及苹果、梨、桃等果树生长。

灌区的水源工程为滹沱河上的岗南水库和黄壁庄水库，按照《河北省石津灌区续建配套与节水改造规划报告》，设计渠灌面积 200 万亩，支渠以上（含支渠）骨干渠道总长度 1442km；通过多年的建设，特别是 1997 年以来的灌区续建配套项目与节水改造项目的实施，共完成支渠以上骨干渠道混凝土防渗 221.8km，灌区工程条件和农业生产条件得到了很大程度的改善。

(2) 渠道防渗防冻胀技术应用

近几年灌区在渠道防渗防冻胀措施应用方面，在满足规范设计要求的前提下，推广使用了聚乙烯闭孔泡沫塑料板、806 树脂油膏、聚苯乙烯泡沫保温板、

土工膜、丹强丝（K.V Fiber 抗裂合成纤维）等新型填缝、保温、抗渗、抗裂材料。

① 聚乙烯闭孔泡沫塑料板

近年实施的续建配套项目中，在总干渠险工段、军干渠等渠道混凝土衬砌工程中均使用聚乙烯闭孔泡沫塑料板作为混凝土防渗板接缝材料。该材料具有密度小、回复率高、具有独立的气泡结构；表面吸水率低，防渗透性能好；耐老化性能优良；低温不脆裂，高温不流淌等特点；同时该材料可按断面形状裁剪或粘结，施工非常方便。为提高板缝的抗渗能力，可在接缝混凝土板下部铺设油毡条。

② 聚苯乙烯泡沫保温板

考虑到混凝土板防冻胀的需要，灌区先后在军干渠、四千渠等渠道防渗工程中使用聚苯乙烯泡沫保温板，保温防冻胀效果良好。聚苯乙烯泡沫保温板的主要技术指标一般控制在：热导系数 $\leq 0.4\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，密度 $\geq 20\text{kg}/\text{m}^3$ 。保温板厚度根据冻土深度并结合渠道走向等因素确定。

③ 复合防渗土工膜

复合防渗土工膜为土工织物与土工膜复合而成的不透水材料，分为一布一膜和两布一膜，宽幅 4-6m，重量为 $200\text{-}1500\text{g}/\text{m}^2$ ，防渗效果好，抗拉、抗撕裂、抗顶破等物理力学性能指标高；同时土工膜防渗也可减少水的渗漏，从而大大缓解混凝土板下土体的冻胀力。

④ 806 树脂油膏填缝材料

与传统的沥青油膏相比，新型防水油膏——806 树脂油膏具有韧性好，粘结力强，低温不易裂等特点，且使用寿命长，施工简单。自 1997 年灌区续建配套工程使用以来，806 树脂油膏已经在灌区得到了全面推广应用，止水效果良好。

⑤ 丹强丝（K.V Fiber 抗裂合成纤维）

丹强丝（K.V Fiber 抗裂合成纤维）是一种新型高分子建筑材料，施工时，可根据配比直接将整袋纤维投入搅拌机，适当延长搅拌时间即可，对混凝土骨料、外加剂、掺合剂、水泥都不会有任何影响，对搅拌设备也没有特别的要求；主要作用是应用于各类混凝土/砂浆制品，能够显著提高制品的抗裂、抗渗、抗冲磨、耐冻融等功效。灌区在一千五分干混凝土防渗工程中选取了部分渠段布置丹强丝纤维混凝土试验段。

⑥聚硫密封胶

双组份聚硫密封胶适用于长期浸水建筑接缝密封，与混凝土粘接性能好，具有耐老化性、耐久性、气密性和防水性以及良好的粘接性，是防水止渗不可缺少的密封材料。

(3) 典型渠道（渠段）防渗防冻胀技术措施及效果

1) 混凝土+保温板+闭孔泡沫塑料板伸缩缝

此种结构形式的典型渠道为军干渠。军齐南干渠进水闸位于石津总干渠 101+805 处，基本沿着辛集市与深州市的交界自北向南延伸，控制行政区域为辛集市、深州市、冀州市的部分地区以及衡水桃城区，干渠全长 29.32km，耕地面积 69.31 万亩，设计灌溉面积 49.13 万亩。是灌区的一条重要输水渠道，土质以粉砂壤质和轻壤质土为主，在近几年的续建配套工程中已完成军干渠混凝土防渗 17.24 km，衬砌结构形式采用混凝土+保温板+闭孔泡沫塑料板伸缩缝的方式，渠道主要技术指标为：设计流量 35.2 m³/s，设计渠底宽度 14.5m，边坡 1:2，衬砌高度 2.30m，护肩宽 0.30m，护肩厚 0.10m，衬砌厚度 0.1m；衬砌混凝土强度等级 C20、抗冻等级 F150、抗渗等级 W6；混凝土板下铺垫聚苯乙烯保温板（密度 ≥20kg/m³），板厚 3cm。沿渠道每 4m 设横向伸缩缝，纵向伸缩缝共设 4 条。渠底设 2 条，沿坡脚设 2 条；缝中填充闭孔泡沫塑料，接缝混凝土板下部铺设 300mm 宽的油毡条。军干渠混凝土防渗工程实景图及横断面结构见下图。



图 3-48

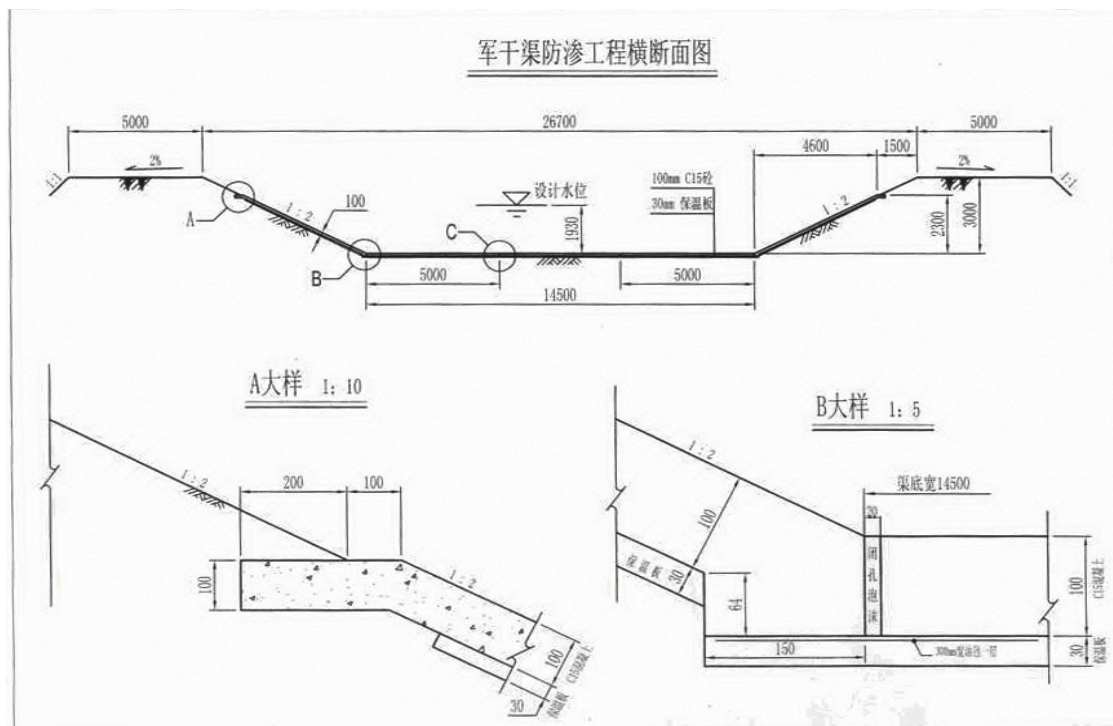


图 3-49

通过运行观测，渠道衬砌效果整体较好，防冻胀效果较为理想，渠道混凝土板无明显裂缝；少量闭孔泡沫伸缩缝出现闭孔泡沫塑料板与混凝土结合不紧密现象，可能影响缝止水效果，但尚未进行定量观测。

2) 混凝土+保温板+土工膜+闭孔泡沫塑料板伸缩缝+聚硫密封胶

此种结构形式为灌区衬砌渠道中目前采用的最高标准，典型渠道为总干渠田庄段。该渠段位于石家庄市，铁路枢纽货运系统及石太高速公路均跨越该渠段。渠道土质为壤土，主要技术指标为：设计流量 $115\text{m}^3/\text{s}$ ，设计底宽 28m ，边坡 $1:2$ ，混凝土衬砌厚度 0.1m ，强度等级 C20 、抗冻等级 F150 、抗渗等级 W6 ，衬砌高度 4.0m ，混凝土板下铺垫密度不小于 $30\text{kg}/\text{m}^3$ 聚苯乙烯保温板进行防冻，板厚 6cm ，保温板下铺设两布一膜防渗土工膜（密度 $1000\text{g}/\text{m}^2$ ）。伸缩缝采用闭孔泡沫塑料，缝顶部用聚硫密封胶封堵。总干渠田庄段混凝土防渗工程实景图及横断面结构见下图。



图 3-50

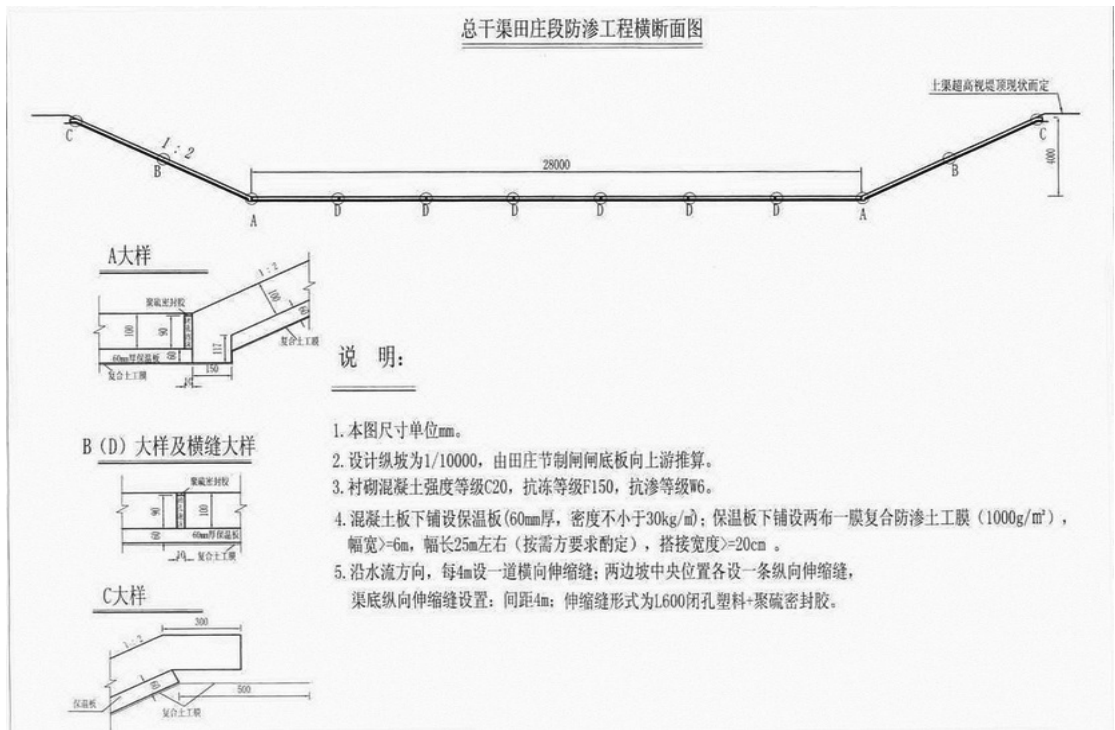


图 3-51

此工程完工不久，尚未经灌溉运行，聚硫密封胶的使用从完成效果看，与混凝土结合密实，应具有良好的止水效果。

3) 混凝土+保温板+土工膜+树脂油膏伸缩缝

此种结构形式在四千二分干、四千三分干等渠道防渗工程中均有应用，以四千二分干(20+068-22+124)段为例，该渠段土质以壤土为主，主要技术指标为：设计流量 $5.5\text{m}^3/\text{s}$ ，混凝土强度等级 C20、抗冻等级 F50、抗渗等级 W6；渠道底宽 3.0m，衬砌高度为 1.85m，渠深 2.2m，纵坡 1/5000，内边坡 1: 2，混凝土衬

砌厚度 0.1m, 堤顶宽度 2.0m。混凝土板下铺设聚苯乙烯保温板(密度 $\geq 20\text{kg/m}^3$), 板厚 3cm, 保温板下铺设两布一膜防渗土工膜(860g/m^2)。伸缩缝的填料为下部 3.0cm 厚水泥砂浆, 中部 4.0cm 厚树脂油膏, 上部填筑 3.0cm 厚水泥砂浆。四千二分干渠混凝土防渗工程实景图及横断面结构见下图。



图 3-52

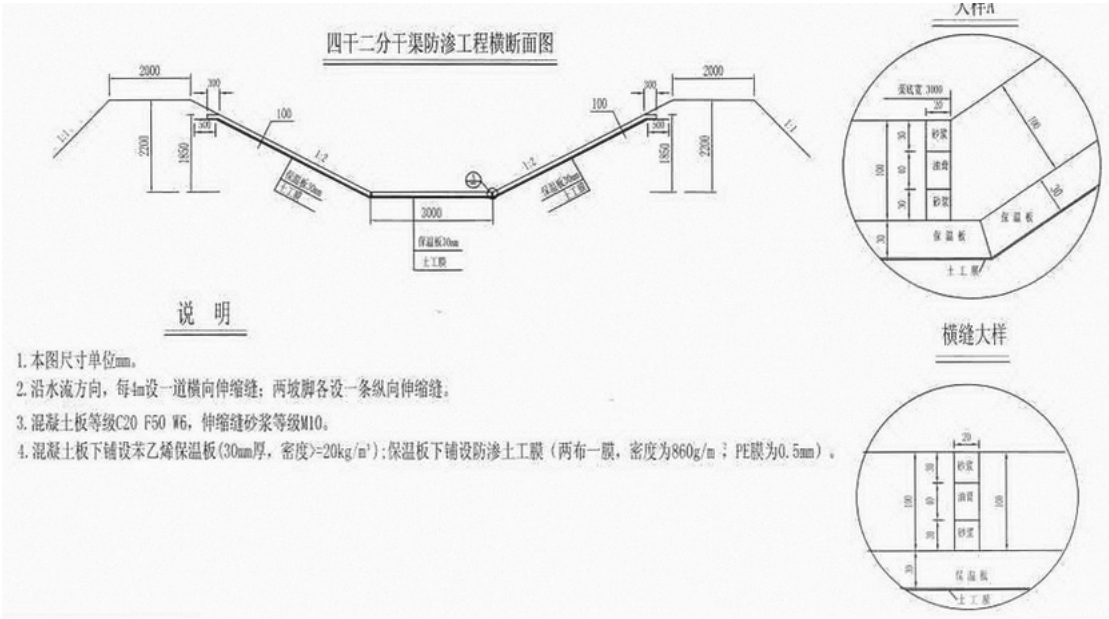


图 3-53

经运行后观测, 渠道混凝土板外观均匀密实, 渠坡无明显裂缝; 树脂油膏伸缩缝未见开裂处防渗效果较好。

4) 混凝土+丹强丝(K.V Fiber 抗裂合成纤维)+树脂油膏伸缩缝

灌区于 2002 年在一千五分干(9+882—10+082)渠段防渗设计中, 采用了混凝土+丹强丝(K.V Fiber 抗裂合成纤维)+树脂油膏伸缩缝的方式。丹强丝混凝土护砌段长 200m, 分别为 8cm 厚丹强丝混凝土护砌段, 和 6cm 厚丹强丝混凝土护砌, 两段相邻, 各长 100m。

该渠段设计流量 $4.27\text{m}^3/\text{s}$ ，混凝土护砌底宽 2.0m ，衬砌高度为 1.45m ，渠深 1.60m ，纵坡 $1/3000$ ，内边坡 $1:1.5$ ，混凝土衬砌厚度 $0.08(0.06)\text{m}$ ，堤顶宽度 2.0m ；混凝土强度等级 C15、抗冻等级 F50、抗渗等级 W4；沿渠道每 4m 设横向伸缩缝，缝中填充树脂油膏及砂浆，坡脚设 2 条纵向伸缩缝。详见一千五分干“丹强丝”试验段设计图。

经过 8 年的运行，目前， 6cm 厚混凝土板外观均匀密实，仅有 4% 的混凝土板有约 30cm 长细微裂缝，较细，无贯穿； 8cm 厚混凝土板外观均匀密实，仅有 2% 的混凝土板有细微裂缝，无贯穿。树脂油膏伸缩缝未见开裂防渗效果较好。



图 3-54 一千五分干渠混凝土防渗工程实景图（ 6cm 厚）



图 3-55 一千五分干渠混凝土防渗工程实景图（ 8cm 厚）

3.2.3.3 山东簸箕李灌区

(1) 灌区概况

簸箕李灌区位于山东省北部，黄河下游左岸，黄河三角洲腹地。南起黄河，北以漳卫新河为界，与河北省海兴县隔河相望，东与白龙湾、小开河灌区相邻，西与济南、德州市接壤；地理坐标为东经 $117^{\circ} 14' 37'' \sim 117^{\circ} 58' 44''$ ，北纬 $37^{\circ} 07' 41'' \sim 38^{\circ} 14' 57''$ ，南北长 130 公里，东西平均宽 17 公里，总面积 2243 平方公里。灌区涉及惠民、阳信、无棣三县，24 个乡镇，总人口 102.8 万人。灌区属于华北半干旱季风气候区，冬春干旱多风，夏季炎热多雨，年平均气温 12°C ，一月份气温最低，平均 -4°C ，七月份最高，平均 26°C ，历史最高气温 41°C 。历史最大风速 35.5m/s ，最大风力 8~9 级。降雨量年内分配不均，年际变化较大，灌区内多年（1952-2008 年系列）平均降雨量 561 毫米，其中汛期 444 毫米，占全年降雨量的 79.14%，年最大降雨量 1112.4 毫米（1964 年），年最小降雨量为 258.5 毫米（2002 年），年平均日照时数 2250 小时，年平均蒸发量 1195.1 毫米，无霜期 215 天，年平均干旱 240 天。由于年降雨分配不均匀和春季强烈蒸发形成“春旱、夏涝、晚秋又旱”的特点。

簸箕李灌区近几年来围绕建设“节水型、生态型、科技型、服务型、效益型”五型灌区的目标，抓住国家对大型灌区实施续建配套与节水改造的机遇，大力实施节水改造，取得了显著成效。自 2005 年被列为国家第二批大型灌区节水改造项目以来，累计完成干级渠道衬砌 18.5 公里、改造配套建筑物 65 座、渠道绿化 35 公里等。目前灌区内干渠 4 条总长度 159.7 公里，已防渗 33.82 公里，防渗率 21%；支渠 134 条，总长 997.5 公里，尚未衬砌。灌区节水改造工程的实施运用，实现了节水增效，减少了渠道淤积，改善了灌区生态环境。

(2) 渠道防渗防冻胀技术应用

1) 总干渠上游段

总干渠上游段总长 35km，衬砌 10km，防渗率 28%，完好率 90%。断面形式为梯形，防渗方式是全断面防渗、边坡衬砌。渠坡采用预制混凝土板下铺复合土工膜，规格为一布一膜，布 200g/m^2 ，膜厚 0.2mm。渠底为塑膜防渗，薄膜厚度 0.2mm，设在渠底以下 0.6m。该渠段于 2006、2007 年秋冬季衬砌，至今运行稳定

良好。

2) 总干渠下游段

总干渠下游段总长 14.9km, 衬砌 14.9 km, 防渗率 100%。断面形式为梯形, 防渗方式是全断面防渗、边坡衬砌。渠坡采用预制混凝土板下铺塑膜, 渠底为塑膜防渗。该渠段于 1990 年衬砌, 渠坡稳定, 然而渠底塑膜损坏较为严重。

3) 一千渠

一千渠总长 42.7km, 衬砌 0.4 km, 防渗率 1%。断面形式为梯形, 防渗方式是半断面衬砌, 渠坡采用预制混凝土板下铺复合土工布 (一布一膜)。该段渠道于 2005 年衬砌, 至今运行稳定良好。

4) 二千渠

二千渠总长 66 km, 衬砌 8.2 km, 防渗率 12%, 完好率 95%。断面形式为梯形, 防渗方式是半断面衬砌, 渠坡采用预制混凝土板下铺土工布 (一布)。该段渠道于 2008、2009 年衬砌, 总体运行稳定良好, 仅局部渠段出现变形隆起冻胀破坏及坍塌等现象。

(3) 典型渠道 (渠段) 防渗防冻胀技术措施

1) 总干渠上游段防渗工程

灌区属于华北暖湿半干旱季风性气候区, 冬季寒冷而漫长, 一月份平均气温 -4°C , 极端最低气温为 -22°C , 最大冻土深 0.54m。地质条件为: 总干渠上游段土质较差, 为沙土。防渗工程全长 9.1km, 设计流量 $70\text{m}^3/\text{s}$ 。断面形式为梯形, 底宽 34.0m、渠底比降 1/7000、衬砌高度 2.86m, 边坡 1: 2。防渗方式是全断面防渗、边坡衬砌。渠坡采用预制混凝土板下铺复合土工膜, 规格为一布一膜, 布 $200\text{g}/\text{m}^2$, 膜厚 0.2mm。为满足砟板适应冻胀变化, 且方便施工, 经计算确定标准砟板尺寸为 $58 \times 38 \times 6\text{cm}$, 错缝半板 $27 \times 38 \times 6\text{cm}$ 。砟板标号采用 C20、W8、F100。渠底采用塑料薄膜防渗, 塑膜厚度 0.2mm, 设在渠底以下 0.6m。齿墙: 为保证边坡护板稳定, 且防止坡脚冲刷, 在渠底坡脚处设齿墙, 顶宽 40cm, 底宽 60cm, 深 60cm, 其中顶部为现浇 C15 砟齿墙厚度 15cm, 其他为 M10 浆砌片石。结构缝及伸缩缝: 为避免因温度应变引起砌体破坏, 纵横向均设伸缩缝, 顺渠向每隔 12.4m 设一道横向伸缩缝, 顺坡向在渠坡 1/3 渠深处设一道纵向伸缩缝, 伸缩缝宽度为 4cm, 下部充填 $4 \times 4\text{cm}$ 的预制塑料胶泥, 顶部用低标号水泥

砂浆塞实抹平，达到防老化之目的；板间结构缝宽度 4cm，C20 细石砼填充，提浆抹平。封顶板：为防止雨水冲刷渠道内坡，在护坡顶部现浇 60cm × 15cm 的 C15 砼封顶板。齿墙及封顶板顺渠向每 12.4m 设一道伸缩缝，缝宽度为 2cm，以 2cm 厚沥青杉板填充。

渠道衬砌至今 3 年，整体运行状况良好，仅局部渠段出现变形隆起冻胀破坏现象。

2) 二千渠防渗工程

二千渠土质较差，为沙壤土，地下水位较高（10.5m 左右）。防渗工程全长 8.2km，分两段：第一段 4+093 ~ 8+193，设计流量 40m³/s，)；第二段 23+119 ~ 27+247，设计流量 35m³/s。采用半断面砼预制板衬砌（两坡），坡面砼板下铺设土工布。主要设计指标：底宽 17.0m、渠底比降 1/7000、衬砌高度 2.80m，边坡 1: 2。为满足砼板适应冻胀变化，且方便施工，结合灌区已建工程经验确定标准砼板平面尺寸为 58 × 38cm，错缝半板 27 × 38cm，下部异型板平面尺寸为 58 × 58cm。砼板厚度 80mm。砼板标号采用 C20、W8、F100。

由于该地区地下水位较高，基本接近设计水位，渠道渗漏量较小，故不进行防渗处理，但是该渠段土质较差，为方便施工预制板下铺设 300g/m² 的土工布。抗侧渗处理：边坡第二、三、四行间隔布置无砂砼预制板，无砂砼预制板下设砂石反滤层以利排水。齿墙：为保证边坡稳定，防止坡脚冲刷，渠底脚设 C15 现浇砼齿墙，宽 40cm，深 60cm。结构缝及伸缩缝：为避免因温度应变引起砌体破坏，顺渠向每隔 9.92m 设一道横向伸缩缝，伸缩缝宽度为 4cm，下部充填 4 × 6cm 的塑料胶泥条，顶部用 M5 水泥砂浆塞实抹平，达到防老化之目的；板间结构缝宽度 4cm，C20 细石砼填充。封顶板：为防止雨水冲刷渠道内坡，在护坡顶部现浇 60cm × 20cm 的 C15 砼封顶板。齿墙及封顶板顺渠向每 9.92m 设一道伸缩缝，缝宽度为 2cm，以 2cm 厚沥青杉板填充。渠段首尾边坡处，分别设有 C15 砼刺墙（40cm × 60cm）一道。

(4) 防渗防冻胀技术措施应用体会

①在设计上，渠道的边坡不宜过陡，应考虑渠基自身的稳定和施工的要求。该灌区典型渠道边坡均为 1:2；混凝土的强度、抗渗、抗冻要满足要求，该灌区采用混凝土强度等级 C20，抗冻等级 F100，抗渗等级 W8。

②防渗结构采取混凝土板和防渗膜组合结构能有效的防渗和抗冲，即板下铺设土工膜。混凝土板厚根据渠道大小确定，总干渠 60mm，二千渠 80mm，防渗膜用素膜（总干渠下游段）或复合土工膜（总干渠上游段），厚度 0.2mm。不进行防渗处理的渠段如二千渠采用板下铺设土工布。

③砂石反滤层排水消除冻胀破坏。在地下水位较高的渠段，如二千渠，遇到渠道边坡和渠底大量渗水的情况，导致铺设塑膜后，渗水因塑膜阻碍而无导出路，这时塑膜和混凝土板将受到较大的渗透压力，导致边板和底板被顶起，成为废板。针对此问题解决的方法是：边坡第二、三、四行间隔布置无砂砼预制板，无砂砼预制板下设砂石反滤层以利排水。

④施工时要保证施工质量，填方渠道土方质量是防渗工程的基础，也是防冻害的主要环节之一，渠基土要充分压实，垫层要铺均匀，塑料薄膜的接缝要牢固可靠，混凝土要震捣密实，填缝材料要饱满。

⑤完善渠道运行管理制度，做好渠道日常养护、安全检查和维修工作，及时清除渠道中杂草、蚁穴、鼠洞等阻碍物，建立经常检查、定期检查和特别检查的检查制度，按照经常养护、随时维修、养重于修、修重于抢的原则，使渠道得到及时维修，保证使用。对产生冻胀破坏的渠段要及时维修，以免破坏现象蔓延。

⑥冬季需要引水运行时，尽量使渠道满渠运行并设法使渠道中不结冰，这样可防止渠道冻胀。

⑦在渠旁两侧设 8~10m 林带，可起生物排水作用，对降低地下水位、防治渠道冻害十分有利。总干渠下游段就是一个很好的例子。

4 渠道防渗防冻胀技术应用模式

通过对我国北方季节性冻土地地区渠道防渗防冻胀技术应用情况的调查分析表明，渠道防渗防冻胀技术应用比较广泛的措施主要有置换、保温、排水以及采用适应冻胀变形的断面形式等。另外，在渠道防渗工程冻胀破坏严重的地区，采用单一的防渗材料和防冻胀结构形式一般很难达到理想的防冻胀目的，因此，在灌区续建配套与节水改造工程建设中，许多灌区根据渠道所在地的土壤质地及气象水文特点，因地制宜，采用两种或两种以上防渗材料及防冻胀复合结构形式，起到了很好的防渗防冻胀效果。

4.1 置换措施应用模式

置换措施是在冻结深度内将渠道防渗衬砌板下的冻胀性土换成非冻胀性土的一种方法，置换材料宜采用砂砾石或中粗砂。级配良好且纯净的砂砾石或中粗砂垫层不仅本身无冻胀，而且能排除渗水和阻止下卧层水分向表层冻结区迁移，所以能有效地减少冻胀，防止冻害现象的发生。图 4-1 为混凝土衬砌板+置换材料防渗防冻胀结构形式，该结构形式是灌区续建配套与节水改造中应用最普遍的防冻胀技术措施。当冻结深度较大时，为完成消除冻胀影响，需要全部置换冻结深度内的冻胀性土，因此，工程量较大，一般不经济。在灌区节水改造中，新疆、内蒙等地采用戈壁料和风积沙作为置换材料，不仅起到了很好的防冻胀作用，而且降低了工程投资。

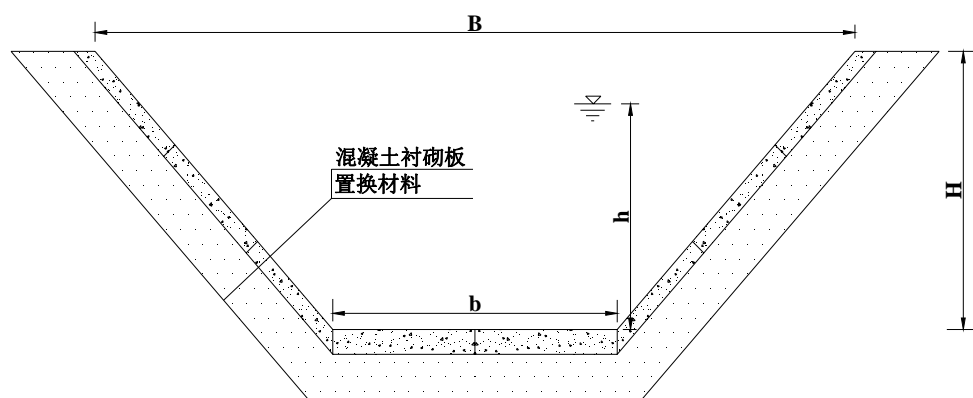


图 4-1 混凝土衬砌板+置换材料防渗防冻胀结构形式

该渠道防渗防冻胀结构形式适用于季节性冻土地区、渠基土为冻胀性土、地下水位较低、附近有砂砾石或中粗砂等非冻胀性土的大中型渠道。置换措施应用时要注意，当置换层有被淤塞危险时，应在置换体迎水面铺设土工膜或土工织物保护；若置换层有可能饱水冻结时，应保证冻结期置换体有排水出路，即需要设置排水措施。

4.2 保温措施应用模式

保温措施是在渠道衬砌体下铺设隔热保温层，阻隔大气与渠基土的热量交换，提高衬砌体下基土温度，消减或消除冻胀，防止发生冻害。灌区续建配套与节水改造中，采用保温措施防冻胀已得到大量应用，如新疆、甘肃、内蒙、黑龙

江等省（区）的灌区采用聚苯乙烯泡沫板（简称聚苯板）保温防冻胀，取得了良好的防冻胀效果。聚苯板具有吸水性小、强度高、耐腐蚀和抗老化等优点，根据试验资料，1cm厚的泡沫塑料保温层相当于14cm厚填土的保温效果，具有良好保温效果。图4-2为混凝土衬砌板+砂浆过渡层+聚苯板防渗防冻胀结构形式。

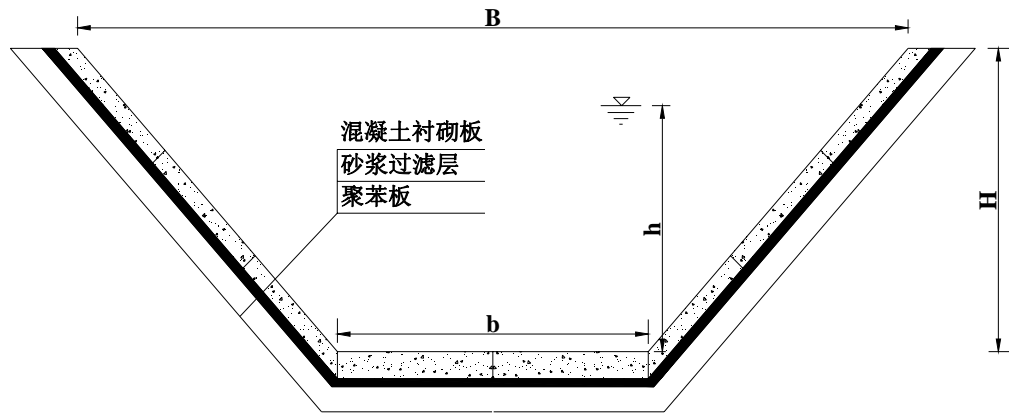


图 4-2 混凝土衬砌板+砂浆过渡层+聚苯板防渗防冻胀结构形式

聚苯板价格较高，因此，该结构形式适用于在采用其他防冻胀办法不经济时或遇到一些特殊地段，如在冻深较大，缺少砂石地区或地下水浅埋地区的大中型渠道。保温措施应用时要注意，多数保温材料的保温效果随着潮湿及吸水率的增大而降低，特别是当地下水位较高时，由于地下水的长期浸泡会使其导热系数增加，进而降低保温效果，因此，一般应与塑料薄膜或复合土工膜配合适用，防渗防冻胀效果更好。

4.3 排水措施应用模式

当地下水位高于渠底，或地下水位虽不很高，但渠基土透水性差，渠道的渗漏水 and 浸入渠基的雨水不能很快渗入基层深处时，应根据渠道所处的地形和水文地质条件，按不同情况设置排水设施，以达到排泄畅通、地基疏干、冻结层无水源补给的目的。灌区续建配套与节水改造工程建设中，采用排水措施防冻胀技术也得到广泛应用，许多灌区结合渠道的具体特点，采取了形式多样的排水措施，取得了很好的防冻胀效果。

新疆金河沟引水干渠采用竖向排水井连通置换垫层和深层砂砾层的排水系统，如图4-3所示，起到了良好的排水防冻胀效果。该渠道所处地方地下水位深，渠床土质为壤土，厚度5~7.5m，以下为埋藏很厚的砂砾层，衬砌体下铺设了20~

50cm 厚的砂砾垫层，每 25m 渠段设一道竖井与土层下面的砂砾层连通。竖井断面为矩形，长 1.2~1.8m，宽 1.1~1.9m，内填粗砾石和卵石。经运行，排水效果很好。但这种型式适应于地下水位较深，并且在渠底不远处具备砂砾石地层的条件。

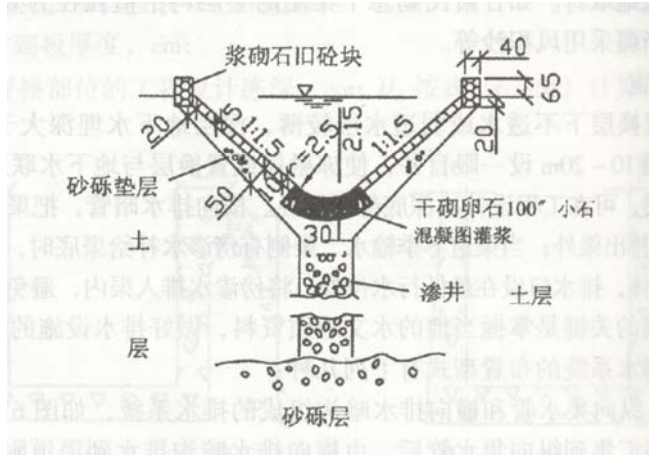


图 4-3 新疆金河沟引水干渠竖向排水设施

甘肃景电灌区总干渠 4#隧洞出口至独一农间渠道采用排水盲沟+排水花管的排水系统，如图 4-4 所示，起到了良好的排水防冻胀效果。该段渠道处于全灌区最低洼地段，为深挖方岩石渠道，地下水高出渠底 0.3~0.5m，且不易排出。灌区在节水改造工程中，渠底部设置深 80cm 的梯形砂碎石反滤排水沟，沟内设置 2 条 $\phi 160$ PVC 排水花管，排水花管上包裹一层反滤布，将渠道地下水汇入排水沟（管）内再排入横穿总干渠 12+748 处的灌区总干排水沟。采用以上排水措施后，渠道内再无地下水出露，彻底解决了渠道的冻胀问题。

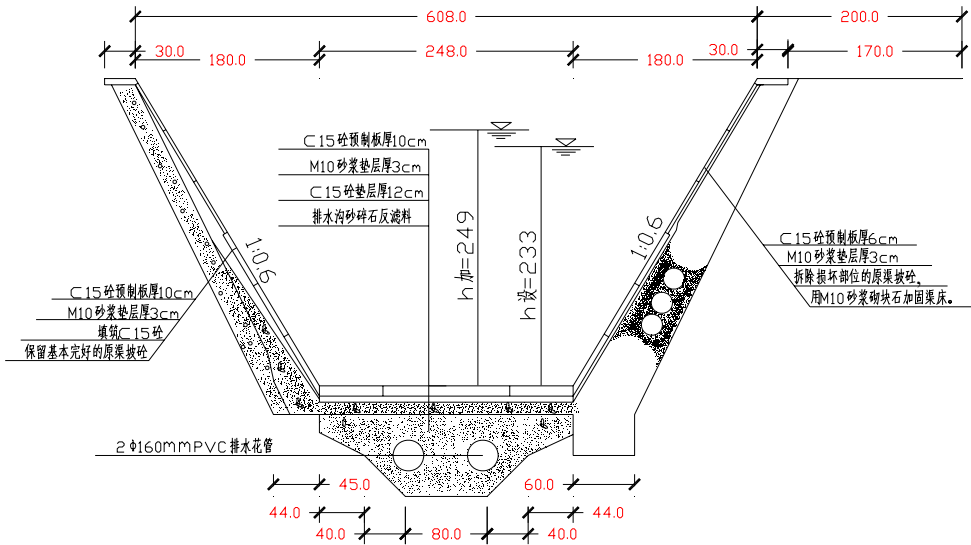


图 4-4 甘肃景电灌区总干渠排水设施

4.4 适应冻胀变形断面形式应用模式

适应冻胀变形的断面形式主要有 U 形断面、弧形坡脚梯形断面或弧形渠底梯形断面等，这些断面形式在灌区续建配套与节水改造工程中都得到广泛应用。图 4-5 为常用的几种适应冻胀变形的断面形式。

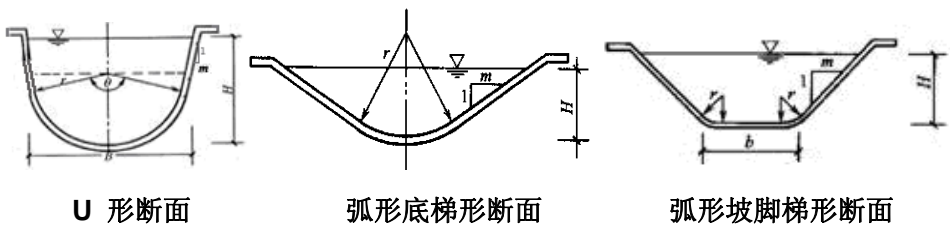


图 4-5 适应冻胀变形的断面形式

U 形断面一般适用于小型渠道，弧形渠底梯形断面适用于中型渠道，弧形坡脚梯形断面适用于大型渠道。适应冻胀变形的断面形式应用时应注意，对于冻胀量不大的填方渠道可单独适用，在冻胀量较大时，弧形坡脚梯形断面和弧形渠底梯形断面一般应与其他防冻胀措施配合适用，才能起到更好的防冻胀效果。

4.5 复合防渗防冻胀技术应用模式

采用单一的防渗材料和防冻胀结构形式，一般很难达到理想的防渗防冻胀效果，下面是几种在灌区节水改造中应用比较成功的渠道防渗防冻胀复合结构形式。

(1) 渠道边坡混凝土衬砌+渠底柔性结构防护

衬砌渠道边坡的结构形式是在进行渠道衬砌防渗时，渠道边坡采用混凝土衬砌，渠道底部采用非刚性材料防护的方法。这种结构形式适用于大中型渠道，在应用时应分以下两种情况：

①地下水位高于渠底时。渠道边坡宜采用混凝土板+置换材料，渠底采用透水材料防护。这种情况时不宜采用混凝土衬砌+膜料全断面防渗，防冻胀也不宜采用聚苯板保温措施。图 4-6 为新疆北屯灌区三千渠防渗防冻胀形式，渠道边坡采用现浇混凝土板+戈壁料垫层，渠底采用雷诺护垫填充砾石。这种结构形式具有防冻胀、渠底防冲、排水等作用，渠底适应冻胀变形能力强，一般适用于季节

性冻土地区、地下水位较高、渠道纵坡较大的大中型渠道。

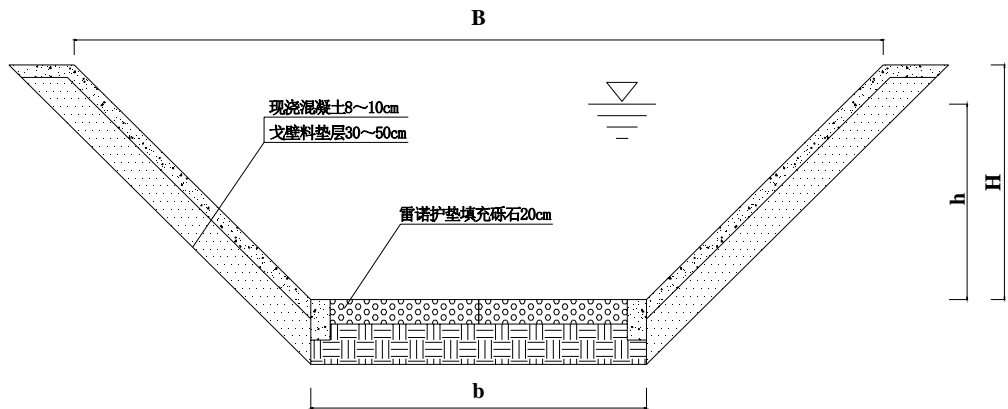


图 4-6 新疆北屯灌区三干渠防渗防冻胀结构形式

②地下水位低于渠底时。渠道边坡宜采用混凝土板+膜料+置换材料，或混凝土板+膜料+聚苯板，渠底采用膜料防渗，土料保护层防护。图 4-7 为内蒙古河套灌区永济干渠防渗防冻胀形式，渠道边坡采用预制混凝土板+膜料+聚苯板，渠底采用膜料+土料保护层。这种结构形式防渗、防冻胀效果好，投资较少，一般适用于季节性冻土地区、地下水位较低、渠道纵坡较小、宽浅式的大中型渠道。

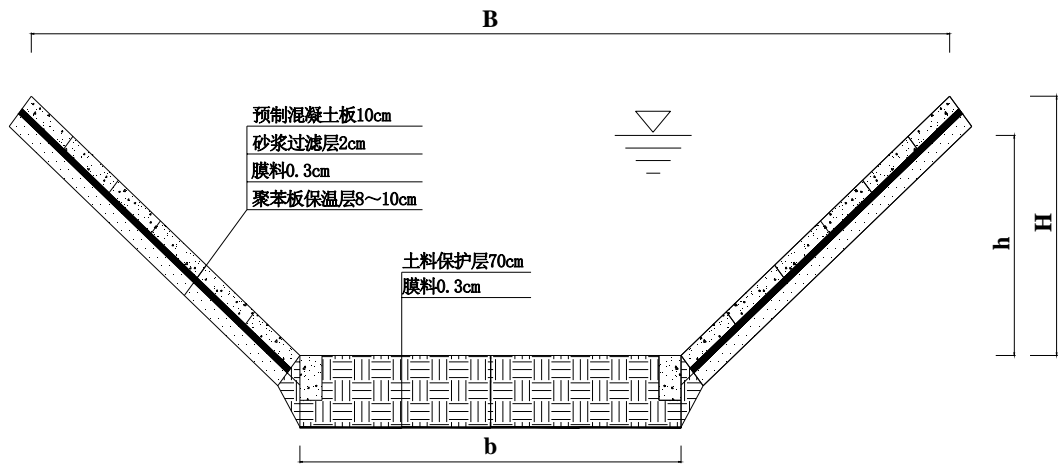


图 4-7 内蒙古河套灌区永济干渠防渗防冻胀结构形式

(2) 弧底梯形预制混凝土板+膜料防渗结构

弧底梯形是一种能够适应冻胀变形的渠道断面形式，渠道弧底一般采用现浇混凝土，其适用于渠基冻胀变形较小的中小渠道防渗防冻胀。但是，有的灌区所处地区冬季寒冷，不宜施工，春、夏、秋季渠道停水时间很短，不能满足现浇混凝土衬砌渠道的时间要求，使其推广应用受到很大限制。图 4-8 为内蒙古河套灌

区采用弧底梯形预制混凝土板+膜料防渗结构形式，其全断面均采用预制混凝土板，实施结果表明，这种衬砌结构形式具有很好的防渗防冻胀效果，又克服了现浇混凝土渠底需要时间较长的缺点。

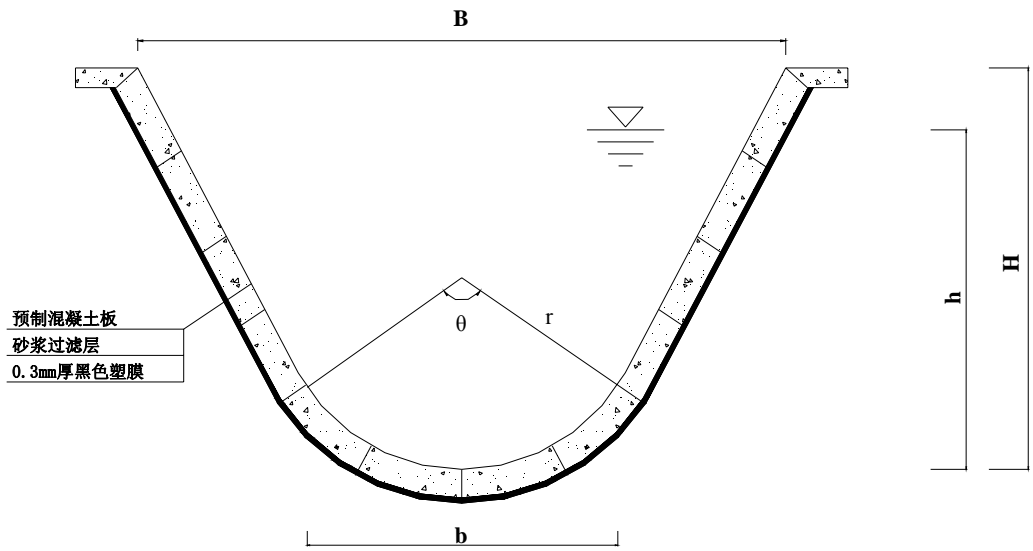


图 4-8 内蒙古河套灌区预制混凝土弧底梯形衬砌结构形式

(3) 膨润土防水毯+土料保护层

膨润土防水毯+土料保护层渠道防渗防冻胀结构形式适用于冻胀破坏比较严重的地区、渠道纵坡较小的大中型渠道。这种结构形式防渗防冻胀效果好，投资较少，一般比混凝土板+膜料+聚苯板结构形式投资可以降低约 30%。图 4-9 为内蒙古河套灌区永刚分干渠防渗防冻胀结构形式，其采用膨润土防水毯防渗、塑性固化土作为保护层的结构形式，具有很好的防渗防冻胀效果。

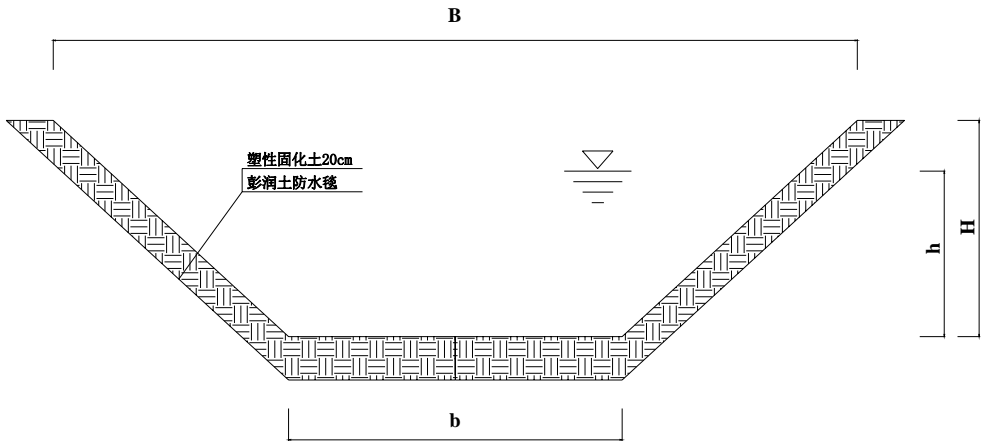


图 4-9 内蒙古河套灌区永刚分干渠防渗防冻胀结构形式

5 结论及建议

5.1 结论

(1)通过对北方季节性冻土地区 13 个灌区典型工程渠道防渗防冻胀技术应用情况调查,掌握了不同类型灌区在渠道防渗防冻胀方面采取的措施、典型工程案例、取得的经验、存在的问题与建议,这些成果为指导北方地区大中型灌区续建配套与节水改造工程建设提供了成功经验和技术支撑。

(2)报告总结了东北、华北和西北地区渠道衬砌工程冻害类型及破坏形式,分析了渠道防渗工程冻胀破坏成因及特征,提出了回避冻胀和消减冻胀措施,已在渠道防渗工程中取得了很好的防渗抗冻效果。

(3)各地根据灌区实际,围绕渠道衬砌工程在新材料、新技术、新工艺方面开展了多项试验研究,取得了一批科研成果,如聚苯乙烯保温材料、固化土材料、膨润土防水毯材料、膜袋混凝土、雷诺垫层、聚合物纤维混凝土、新型伸缩缝止水材料、纳米改性材料防渗技术。这些成果已在渠道衬砌工程中大面积推广应用,防渗防冻胀效果显著,降低了工程造价,提高了衬砌工程使用寿命。

(4)通过对北方不同季节性冻土地区渠道防渗防冻胀情况调查分析,总结出置换措施应用模式、保温措施应用模式、排水措施应用模式、适应冻胀变形断面形式应用模式、复合防渗防冻胀技术应用模式、河套灌区骨干渠道衬砌集成与示范模式、河套灌区田间渠道衬砌集成与示范模式 7 种模式,对北方地区大中型灌区节水改造工程建设具有指导意义。

5.2 建议

(1)组织开展大型灌区节水改造关键技术与技术集成模式研究。建议针对大型灌区续建配套与节水改造工程建设中存在关键技术问题组织科技攻关,走“工程带科研,科研为工程”之路,从工程建设经费中提取一定比例用于试验研究,实行科研项目招标,组建研究团队。研究的重点内容有:渠道衬砌新材料、新技术、新工艺研究;渠道衬砌防冻胀技术研究;渠道衬砌施工机械研究;灌区节水改造技术集成模式研究;灌区量水技术研究;灌区信息化技术应用研究;大

型灌区节水改造后对生态环境影响的监测与评价。

(2) 组织开展渠道衬砌专项调研工作。建议组织相关部门、科研、设计与灌区管理单位，认真总结各地近十年来大型灌区节水改造中成熟技术与典型经验，形成调研报告，为全国不同类型大型灌区节水改造工程建设提供科技支撑。

(3) 召开渠道防渗防冻胀技术专题研讨会、学术交流会或现场观摩会，推广各地在渠道防渗防冻胀技术方面取得的新技术、新材料、新工艺和新方法，提高科技成果转化率和大中型灌区建设水平。

(4) 开展聚苯乙烯保温材料在北方衬砌渠道防冻胀中应用评价，对该材料的适用范围、技术条件、防冻胀效果和使用寿命进行专题研究，为大面积推广应用提供科学依据。

(5) 应针对不同地区、不同自然条件和水资源状况，因地制宜地采取防渗措施。在北方季节冻土地区尤其要考虑渠道防冻胀破坏防治措施，达到“防渗、抗冻、经济、可行”的目的。并注重防渗抗冻新技术、新材料、新工艺的推广应用。