

混凝土防渗渠道冬季输水运行中冻胀与抗冻胀力验算

宋 玲, 欧阳辉, 余书超

(石河子大学水利建筑工程学院, 石河子 832003)

摘 要: 为了明确渠道冬季输水时防渗衬砌层结构的抵抗渠床基土冻胀破坏作用的能力, 该文理论分析了大气负温下, 介入刚性防渗面对渠基土冻胀的约束, 得到作用于坡板上冻胀力的作用形式为法向冻胀力和指向坡顶的切向冻胀力, 对被视底端简支、板内无接缝、受冻胀作用的构件受力进行理论分析, 得到冬季输水渠道边坡板的冻胀问题属于非垂直非全周的冻拔问题的结果, 并进一步根据力学基本原理研究了刚性面层(衬砌层)承受荷载力的求解方法。依据桩的抗冻拔验算和拉弯构件的强度验算可实现冬季输水渠道抗冻胀力的计算, 建立了适用于防渗渠道刚性衬砌结构设计的方法, 为冬季输水梯形混凝土防渗抗冻胀渠道衬砌层厚度的准确确定提供了计算方法。

关键词: 渠道; 温度; 含水率; 水利工程; 冻胀力; 刚性面层介入; 承载力验算

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.017

中图分类号: TV3; TV6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-18-0114-07

宋 玲, 欧阳辉, 余书超. 混凝土防渗渠道冬季输水运行中冻胀与抗冻胀力验算[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 114—120. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.017 http://www.tcsae.org

Song Ling, Ouyang Hui, Yu Shuchao. Frozen heaving and capacity of frozen heaving resistance of trapezoidal concrete lining canal with water in winter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(18): 114—120. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.017 http://www.tcsae.org

0 引 言

梯形混凝土衬砌渠道因其施工方便、维护修复简单和工程耐久性强的优点而被广泛地应用输水工程中以达到提高明渠输水效率、增强渠道的防冲能力和改善水流条件的目的。衬砌渠道的渠底宽和边坡斜长是依据水力学条件来确定, 而衬砌层厚度却是依据工程经验和构造要求进行设计确定。经过多年实际工程的检验, 这种不进行混凝土结构设计和验算的方法对于非寒区的混凝土衬砌渠道是适用的; 而对寒区的混凝土衬砌渠道, 即使考虑冻胀作用的影响而特意加大了衬砌层厚度, 也会因渠基土的不均匀冻结膨胀变位而致使衬砌层产生裂缝、隆起和滑塌等破坏现象, 这严重影响了工程效益的直接发挥。人们已进行了衬砌渠道的冻胀破坏特征和产生的原因分析, 进行衬砌层的受力研究^[1-2], 得到冻胀破坏机理^[3-4]、建立了渠道衬砌板为整体^[5-8]或板间为铰接的衬砌层受力模型^[9]及断裂力学模型^[10-11], 并从减少或消除温度、土质和水分三方面不利条件角度提出保温^[12-17]、换填^[18-19]和防水等防冻胀破坏措施, 甚至从冻胀渠基土和衬砌层相互作用的机理来根本上给出了消除或削弱冻胀力^[20-22]的防冻胀破坏综合措施。这些研究成果都是关于冬季不输水的渠道。然而, 还有一类冬季输水的渠道, 如引水式电站的引水渠、给城市供水的大型防渗渠道以及跨流域调水工程的输水渠道, 这些渠道一年四季都过

水。这类渠道在冬季输水过程中不仅存在着水面结冰的问题, 而且在一些渠段上还存在着严重的衬砌层冻胀破坏的问题。国内外对此类衬砌渠道的研究成果多是冰情方面的, 包括冰情数值模拟, 冰情分析、冰情控制、反向输水冰情控制、冰期运行过渡模式研究、冰期的水力响应。目前, 对冬季输水渠道衬砌层的冻胀破坏方面研究, 除了就破坏形式进行过调查研究, 再未进行其他方面的研究。目前已成功建立了梯形断面混凝土衬砌渠道冬季不输水时的力学模型, 并提出了被动式的防冻胀破坏措施, 却鲜有对渠道冬季输水时衬砌结构抗冻胀能力的研究。本文从研究土渠渠床的横断面上温度含水率二元复合场和刚性面层介入入手, 在达到对防渗渠道冻胀机理充分认识的基础上, 创建防渗渠道冬季输水中抗冻胀能力的数学力学模型及验算方法。

1 土渠渠床的横断面温度含水率二元复合场

1.1 开渠前横断面温度含水率二元复合场

在土渠位置开渠前, 其横断面内是一个温度场和含水率场的“二元”复合场, 如图1。当大气温度为负温时, 此二元场会产生复合效应: 即场内靠近临空面一定范围内的土体产生冻结, 其温度梯度最大值方向上各点的温度和含水率分布如图1所示。若土体的含水率大于或等于土的起始冻胀含水率, 则土体冻胀。

1.2 开渠后横断面温度含水率二元复合场

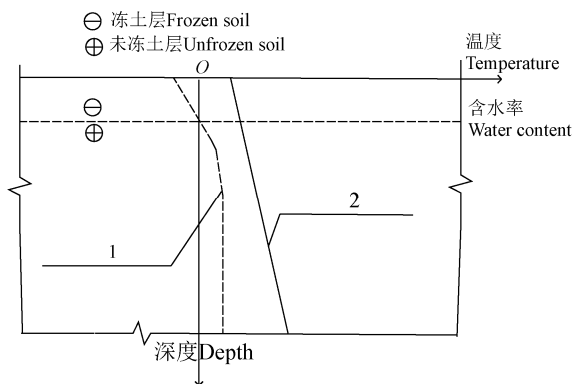
土渠建成后, 该横断面内仍然是一个“二元”复合场——温度场+含水率场。所不同的是, 现二元场的临空面一边是一凹进的梯形折线(渠槽横断面线), 而原二元场的临空面一边是一条平滑线。当大气温度为负温时, 开槽前后温度-含水率场是不同的, 该场内远离渠道处O

收稿日期: 2015-04-08 修订日期: 2015-08-20

基金项目: 石河子大学高层次人才科研启动项目(RCZX201323)

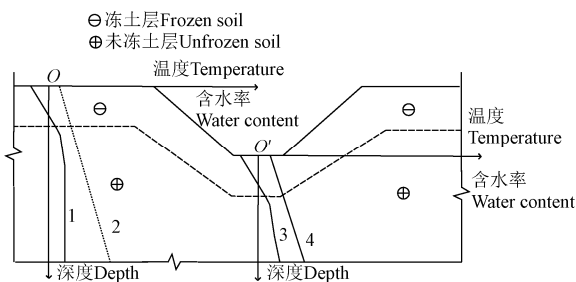
作者简介: 宋 玲, 女, 汉族, 河南商丘人, 博士、副教授, 主要从事水工结构工程及冻土工程学研究。石河子 石河子大学水利建筑工程学院, 832003. Email: xjsds10514@163.com

点和渠底中点 O' 点的渠基土温度梯度最大值方向上各点的温度和含水率分布如图 2 所示, 此时, 若临空面下土体的含水率大于或等于土的起始冻胀含水率, 此二元场内复合效应的结果也是冻胀, 但与图 1 的冻胀有明显的不同。同样与铺设防渗层后的温度-含水率场也有所不同。



1. 土温, 仅随深度变化; 2. 土的含水率, 仅随深度变化
1. Soil temperature, only changed with depth; 2. Soil water content, only changed with depth

图 1 开槽前土基横剖面上温度、含水率二元复合场示意图
Fig.1 Abridged general view of compound temperature-moisture content field before grooving in ground



1. 远离渠道的点 O 下任意深度处土的温度; 2. 远离渠道的点 O 下任意深度处土的含水率; 3. 渠底中点 O' 下任意深度处土的温度; 4. 渠底中点 O' 下任意深度处土的含水率
1. Temperature at any points below O far from canal; 2. Water content at any points below O far from canal; 3. Temperature at any points below O' at the middle of canal bottom; 4. Water content at any points below O' at the middle of canal bottom

图 2 渠基土横剖面上温度、含水率二元复合场中特殊点的温度、含水率示意图

Fig.2 Abridged general view of compound temperature and moisture content at special points in the binary variable field after grooving

1. 2. 1 含水率梯度为正时, 二元场的两种复合效应

含水率梯度为正, 即渠基剖面上所有点的含水率梯度方向都指向渠基土, 且渠堤处的含水率大于或等于土的起始冻胀含水率, 此时若大气温度为负温, 靠近临空面一定范围内的土必冻结并产生冻胀, 于是渠堤顶面和渠底底面分别产生向上的冻胀位移。又因为渠堤土的含水率小于渠底土的含水率, 所以渠堤顶冻胀位移小于渠底冻胀位移。由几何关系可得, 渠槽的边坡长度必小于未冻结前的长度^[23];

含水率梯度为正, 若渠堤渠底土的含水率均小于土的起始冻胀含水率, 当大气温度为负温时, 靠近临空面

一定范围内的土体产生冻结, 但不会产生冻胀。故临空面的各部位不会产生位移, 其几何尺寸无变化。

1. 2. 2 含水率梯度为负或零时, 二元场的两种复合效应

含水率梯度为负或零, 即渠基剖面上所有点的含水率梯度方向都指向临空面或含水率均匀, 大气气温为负, 若渠堤处的含水率大于土的起始冻胀含水率, 土体冻结时一定会产生冻胀, 则渠堤顶冻胀位移大于或等于渠底冻胀位移, 渠槽的边坡长度大于或等于未冻结前的边坡长度。

2 为建模而作的三点简化认定

2. 1 假设混凝土面层为刚性面层

边坡板与底板间为简支, 板内无接缝。

2. 2 视混凝土面层与基土的关系为刚性面层的介入

与土渠相比, 作了防渗衬砌的渠道是在前者的临空面上铺设了一道防渗衬砌层。即使初始时刻土的温度、含水率等其他条件完全相同, 但由于防渗衬砌层的物理热力学等方面的性质不同于渠床土, 土渠的土与铺设了防渗衬砌层的渠道渠床土两者的温度、含水率也会不同。所以衬砌层便成了土渠横断面临空一侧的介入体, 即把铺设衬砌层称为介入, 因混凝土衬砌面层为刚性, 故称此为刚性面层介入。当土渠床的横断面内全部为温度为正时, 土渠床对衬砌面层仅起支承作用, 在克服板自重的情况下二者可分离; 而当土渠床的横断面内与衬砌层相邻的部位出现了负温时, 且渠堤处的含水率大于或等于土的起始冻胀含水率, 衬砌层与其相邻土体则冻结为一体, 仅克服板自重也不能使二者分离。刚性面层的介入不但是减少渠道输水损失和防止冲刷破坏的需要, 而且是其下含水土体冻胀的约束。因为, 当刚性面层和其下含水土体冻结为一体时, 二者接触面间为冰体胶结。若介入层下土体的含水率大于或等于土的起始冻胀含水率, 在冻结过程中必然产生冻胀变位, 而和它冻结为一体的刚性面层则限制它的冻胀变位, 于是就成了它的约束。冻结为一体的坡板对渠堤土的冻胀有约束作用, 而受约束的渠堤土要冻胀就改变了板原来的受力状态。冻土和坡板间的这种一个被约束和一个被改变的状态发展有两种结果: 一种是被约束被改变的关系依然存在, 即冻土和坡板两者的变位变形协调, 两者间仍冻结在一起; 另一种是解除了冻土被约束衬砌层被改变的关系, 即两者的变位变形不协调, 冻土和坡板间的冻结的联结方式遭到破坏, 板和冻结土体分离 (或冻土和坡板两者之一发生大的变形或变位), 冻胀力减弱或降为零。

2. 3 视混凝土面层为一个结构体系

介入的刚性面层 (衬砌层) 是其下土体冻胀变位的约束, 被约束的冻结土体所产生的约束反力直接作用于衬砌层, 便成了作用于衬砌层的荷载。此荷载是由土体冻胀所引起的, 所以又称此荷载为冻胀力。视衬砌层为一个结构体系, 那么, 衬砌层承受冻胀力的能力就是它承受荷载的能力。其关键是将衬砌层看成能承受荷载的结构。原承受冻胀力的衬砌层就成了承受相应荷载的结构。

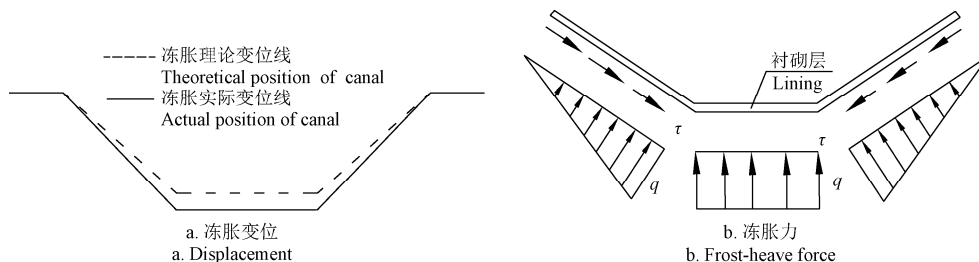
经过上述的认定后,下面可建立梯形混凝土渠道衬砌层承载能力的数学力学模型和进行安全方面的验算。

3 渠道衬砌层的受力分析与安全验算

3.1 渠道衬砌层受冻胀力的情况

渠道的运行方式一般有两种:1)全年除冬季不输水外,其他的季节都输水,如灌区中的农田供水渠道。在冬季因不输水,渠道横断面全部冻结,由于刚性面层的界入影响了含水土体的冻胀,刚性面层未介入前后的渠道基槽轮廓线是不同的,分别见图 3a 中冻胀理论变位线和实际变位线,衬砌层(界入的刚性面层)所受冻胀力如图 3b 所示,对此类渠道的冻胀力学模型已进行大量研究,成果也颇多,本

文不做研究。2)全年都输水,在寒冷的冬季也不例外,如给城市供水的大型防渗渠道。在冬季输水运行中,其横断面水位线以下是不冻结区,水位线以上是冻结区。同样,冻胀时,刚性面层的界入前后的渠道基槽变位见图 4a 中冻胀理论变位线和冻胀实际变位线,作用于衬砌层(界入的刚性面层)的冻胀力如图 4b 所示。由于冬季过水的边坡板的冻胀破坏问题属于非垂直、非全周冻拔问题。而法向冻胀力和切向冻胀力又分别是冻胀力在垂直于边坡板和平行于边坡板方向上的两个分力。由于板下表面附近冻土的温度大体相同,而板下冻土的冻胀力基本相同(在近水位面附近变化较大,文种忽略此影响,这是偏于安全的),法向冻胀力、切向冻胀力的分布都近似为均匀分布。



注: q 为法向冻胀力; τ 为切向冻胀力,下同。

Note: q is normal frost-heave force; τ is tangential frost-heave force, the same as below.

图 3 刚性面层对冬季不过水渠道基土冻胀变位的影响及其冻胀力作用形式

Fig.3 Displacement of soil frost heaving affected by concrete lining and form of frost heaving force in canal without water in winter

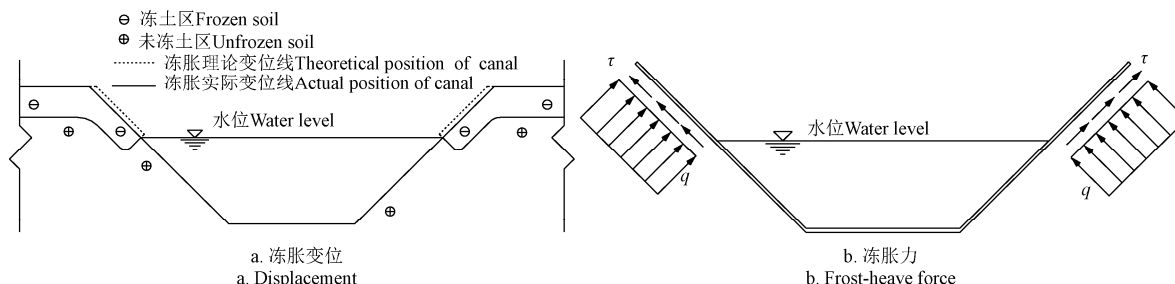


图 4 刚性面层对冬季过水渠道基土冻胀变位的影响及其冻胀力作用形式

Fig.4 Displacement of soil frost heaving affected by concrete lining and form of frost heaving force in canal with water in winter

3.2 冬季输水渠道边坡板的受力分析与抗冻拔验算

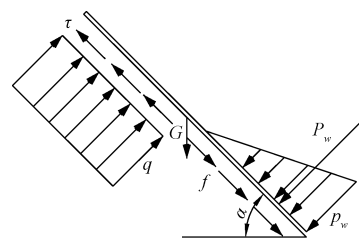
3.2.1 受力分析

沿渠长取单位长度(1 m)为计算单元。边坡板除受自重 G 作用外。水面线以上的边坡板在冻结区,它受其下含水土体的冻胀作用而产生作用于它的法向冻胀力 q 和切向冻胀力 τ ; 水面线以下的边坡板所受的力有:由切向冻胀力 τ 所引起的边坡板与未冻土之间的摩阻力 f 、水压力 P_w ; 如图 5 所示。

3.2.2 边坡板的抗冻拔验算

水压力 P_w 垂直作用于板面。把边坡板的重力(G)分解为垂直于边坡板的法向力与平行于边坡板的切向力,再把切向冻胀力 τ 的合力 $\int \tau ds$ 平移到边坡板斜向的中心,则作用在该边坡板轴线上的力,一个是指向坡顶的力 $F = \int \tau ds$,另一个力矩 $M = \frac{Fh}{2}$, 式中 h 为边坡板的厚度。而未冻结区上的板由于受到指向坡顶的力 $F = \int \tau ds$ 的作用产生滑动趋势,致使板受未冻结土体作

用的摩阻力,方向指向底板。由此可知,该边坡板的冻胀问题属于冻拔问题中较特殊的情况——非垂直、非全周冻拔。



注: q 为法向冻胀力; τ 为切向冻胀力; G 为板的自重; f 为板与土的摩阻力; p_w 为渠底水压力强度; P_w 为水压力的合力; α 为板与水平面间的夹角。

Note: q is normal frost-heave force; τ is tangential frost-heave force; G is slab weight; f is frictional resistance between slab and unfrozen soil; p_w is water pressure strength on the bottom of canal; P_w is resultant force of water pressure on the slope slab; α is angle between slope slab and horizontal surface.

图 5 边坡板受力图

Fig.5 Force diagram of slope lining plate of canal with water in winter

1) 边坡板冻拔力的计算

板受到的冻拔力为胶结界面的面积与切向冻胀力之积, 即 $F = mL \cdot \tau$ 。值得注意的是, 当 $F = mL \cdot \tau$ 大于冻深范围内的冻土总冻结力, 在冻土层内沿着某个面发生剪断破坏。故作用于边坡板的冻拔力取两者小值, 即^[24]:

$$F = \int \tau ds = \min \{mL, H\} \cdot \tau \quad (1)$$

式中: F 为冻拔力, kN; m 为边坡板水上部分的斜长占全斜长的比例; L 为边坡板的斜长, m; H 为当地最大冻土深度, m; τ 为切向冻胀力, kPa; s 为切向冻胀力的分布面积, m²。

切向冻胀力 τ 的最大值等于冻结力, 即冻结强度, 设为 τ_{\max} 。原苏联冻土学专家达马尔托夫提出, 在土温 -15°C 以内, 冻结力 (强度) 和负温之间可以认为是直线关系, 并用下式表示:

$$\tau = c + b|t| \quad (2)$$

式中: $|t|$ 为土的温度绝对值, $^{\circ}\text{C}$; c 、 b 为与土质有关的系数: 壤土, $c=5$, $b=1.2$; 粉质壤土, $c=4$, $b=1$; 含砂重粉质壤土, $c=4$, $b=6$ 。

等效作用的力矩 M : 由于非全周冻拔, 因而还有冻拔力 F 平移而等效作用边坡板上的力矩:

$$M = \frac{Fh}{2} \quad (3)$$

式中: F 为冻拔力, kN; h 为边坡板的厚度, m。

2) 抗冻拔验算

① 抗拔出的验算

冻拔力 F 可由式 (1) 求得。

$$\text{抗冻拔力 } F' = \sum f + G \sin \alpha \quad (4)$$

式中: F' 为抗冻拔力, kN; f 为边坡板与未冻土之间的摩阻力, kPa; G 为边坡板的自重, kN; α 为边坡板与水平面间的夹角。

当 $F \geq F'$ 边坡板会被斜向整体拔出, 不安全; 当 $F < F'$, 边坡板不能被斜向整体拔出, 安全。

② 抗拔强度验算

当边坡板不能被斜向拔出时, 但还有被拔断的可能, 所以还要对它进行强度验算。

边坡板受冻拔力时最容易被拔断的截面在水面线处, 作用在此断面上冻拔力为式 (1) 的计算值。

另外作用在板各截面的弯矩可通过截取坡顶段的内力分析获得, 从而可知冻结锋面处的板截面 (也是易拔断处的断面) 上的弯矩最大, 因此冬季输水渠道边坡板的冻胀破坏往往在水面附近产生裂缝破坏。新疆玛纳斯河四级电站引水渠边坡板的裂缝就在水位面附近。边坡板上最大弯矩为:

$$M' = M + 0.5m^2 L^2 q \quad (5)$$

而

$$q = [3G \cos \alpha + 2P_w(1-m)]/[6mL(1-0.5m)] \quad (6)$$

式 (5) 及式 (6) 中, M' 为边坡板的最大弯矩, kN·m; q 为法向冻胀力, kPa; G 为边坡板的自重, kN; P_w 为水

压力的合力。

根据边坡板的横断面尺寸和作用在其上的 F 和 M' , 可按 $\sigma = \frac{F}{A} + \frac{M'}{W}$ (其中, A 为边坡板横截面面积, m²; W 为截面抵抗矩, m³) 算出危险断面边缘最大应力 σ 。把算出的断面边缘最大应力 σ 和此板的抗拉强度 f_t 进行比较: 当 $\sigma < f_t$, 安全; 当 $\sigma \geq f_t$, 不安全。应注意的是在此类问题验算中往往会出现 $\sigma > f_t$ 的情况, 这时仅靠增加板厚是解决不了问题的, 但可采用局部配筋的方法来满足抗拉要求。

4 工程示例

新疆玛纳斯河电站引水渠全长 4.153 km, 渠道纵坡 1/1 400, 边坡坡度 1:1.5, 底板宽度为 3.0 m, 渠深 4.5 m, 混凝土强度等级为 C20 的衬砌防渗渠道, 渠内水深 3.5 m, 边坡板与底板板厚均为 $h=0.2$ m。渠基土为壤土, 冻土层的最大厚度 $H=1.3$ m, 渠基土与混凝土板的摩擦系数为 0.35, 冻土层的温度为 -10°C 。试验算该边坡板的能否满足抗冻胀的要求。

解: ① 冻土的冻结力 渠基土为壤土, 得 $c=5$, $b=1.2$; $t=-10^{\circ}\text{C}$, 代入式 (2) 得切向冻胀力 $\tau=17.00$ kPa。

② 冻拔力 因 $H=1.3$ m, $mL=1.80$ m; 代入式 (1) 得冻拔力 $F=22.10$ kN。

③ 抗冻拔力 纵轴方向单位长度边坡板的重量 $G=38.93$ kN, $\alpha=33.69^{\circ}$, 水压力合力为 $P_w=110.42$ kN, 摩擦系数 0.35 代入式 (4) 计算得抗拔力 $F'=71.57$ kN; 因 $F < F'$ 所以边坡板不会被斜向整体拔出, 安全。

④ 法向冻胀力 $L=8.11$ m, $G=38.93$ kN, $P_w=110.42$ kN, $m=0.22$ 代入式 (6) 得法向冻胀力 $q=28.27$ kPa。

⑤ 易拔断处弯矩 由式 (3) 得 $M=2.21$ kN·m, 代入式 (5) 得 $M'=47.20$ kN·m。

所以危险截面的最大拉应力 $\sigma=7092.09$ kPa $> f_t=1100$ kPa。

不能满足要求, 边坡板在渠水位附近产生裂缝。

5 结论和讨论

本文不仅首次从场的角度分析渠道横断面内土体的温度-含水率两个标量场的耦合作用, 研究了土体冻胀前后渠坡斜长的变化, 而且首次考虑混凝土渠道刚性衬砌层介入体对渠坡斜长的影响作用, 研究了边坡板下冻胀力的产生机理, 明确了边坡板下冻胀力的作用方式。建立了冬季输水渠道混凝土边坡板的力学模型, 最后对冬季过水渠道混凝土衬砌层的结构设计理论进行研究。得到结论:

1) 冻胀后, 若渠边坡冻胀理论变位后的斜长较实际变位后的斜长短, 则混凝土边坡板受到的切向冻胀力是指向坡底; 若渠边坡冻胀理论变位后的斜长大于实际变位后的斜长, 则混凝土边坡板受到指向坡顶的切向冻胀力。

2) 给出了冬季输水渠道边坡板切向冻胀力和法向冻胀力的计算方法。

3) 建立了冬季输水渠道边坡板的力学模型

4) 冬季输水渠道边坡板的冻胀破坏问题属于冻拔问题中较特殊的情况——非垂直、非全周冻拔。

5) 冬季输水渠道混凝土衬砌层的结构设计时需进行边坡板的抗冻拔验算和拉弯构件强度验算以保证渠道的安全输水。

总之, 冬季输水渠道不仅要进行常规的水力计算, 还要进行抗冻胀能力的验算, 而且边坡应采用无水平分缝的现浇混凝土衬砌, 才能保证防渗渠道安全有效的运行。

然而, 由于冻土的物理力学性质及其本构关系的复杂性, 加之渠道环境的多样性, 尚需进一步研究冻土的力学特性的研究, 方可较准确地确定冻胀力分布特征。

[参 考 文 献]

- [1] 李安国, 陈瑞杰, 杜应吉, 等. 渠道冻胀模拟试验及衬砌结构受力分析[J]. 防渗技术, 2000, 6(1): 5—12.
Li Anguo, Chen Rui-jie, Du Yingji, et al. Simulation test for frost heave and stressing analysis for lining structure of canal[J]. Technique of Seepage Control, 2000, 6(1): 5—12. (in Chinese with English abstract)
- [2] 余书超, 宋玲, 欧阳辉, 等. 渠道刚性衬砌层(板)冻胀受力试验与防冻胀破坏研究[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 639—641.
Yu Shuchao, Song Ling, Ouyang Hui, et al. Experimental study on frost heaving of lining slate of rigid lined canals[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 639—641. (in Chinese with English abstract)
- [3] 廖云, 刘建军, 陈少峰. 混凝土渠道冻胀破坏机制与抗冻技术研究进展[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 211—214.
Liao Yun, Liu Jianjun, Chen Shaofeng. Research progress of damage mechanism of frost heave and anti-frost technique of concrete canal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 211—214. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王正中, 芦琴, 郭利霞, 等. 基于昼夜温度变化的混凝土衬砌渠道冻胀有限元分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 1—7.
Wang Zhengzhong, Lu Qin, Guo Lixia, et al. Finite element analysis of the concrete lining channel frost heaving based on the changing temperature of the whole day[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(7): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [5] 肖旻, 李寿宁, 贺兴宏. 梯形渠道衬砌冻胀破坏力学分析[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(1): 89—93.
Xiao Min, Li Shouning, He Xinghong. Trapezoidal channel concrete lining of frost heaving damage mechanics analysis[J]. Journal of Irrigation and drainage, 2011, 30(1): 89—93. (in Chinese with English abstract)
- [6] 陈涛. 衬砌渠道冻胀破坏力学模型及应用[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2004, 6.
Chen Tao. Establishment and Application of Mechanics of Frost Heaving Damage of Concrete Lining Open Canal[D]. Yangling Shaanxi: Dissertation for Master's Degree of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王正中. 梯形渠道衬砌冻胀破坏的力学模型研究[J]. 农业工程学报, 2004, 24(3): 24—29.
Wang Zhengzhong. Establishment and application of mechanics models of frost heaving damage of concrete lining trapezoidal open canal[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 24(1): 24—29. (in Chinese with English abstract)
- [8] 王正中, 李甲林, 陈涛, 等. 弧底梯形渠道衬砌冻胀破坏的力学模型研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 18—23.
Wang Zhengzhong, Li Jialin, Chen Tao, et al. Mechanics models of frost-heaving damage of concrete lining trapezoidal canal with arc-bottom[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(1): 18—23. (in Chinese with English abstract)
- [9] 申向东, 张玉佩, 王丽, 等. 混凝土预制板衬砌梯形断面渠道的冻胀破坏受力分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 80—85.
Shen Xiangdong, Zhang Yupei, Wang Li, et al. Stress analysis of frost heave for precast concrete panel lining trapezoidal cross-section channel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(16): 80—85. (in Chinese with English abstract)
- [10] 孙杲辰, 王正中, 王文杰, 等. 梯形渠道衬砌冻胀破坏断裂力学模型及应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 108—114.
Sun Gaochen, Wang Zhengzhong, Wang Wenjie, et al. Frost heave fracture mechanical model for concrete lining trapezoidal canal and its application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(8): 108—114. (in Chinese with English abstract)
- [11] 石娇, 王正中, 张丰丽, 等. 高地下水位弧底梯形混凝土衬砌渠道冻胀断裂破坏力学模型及应用[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43(1): 213—219.
Shi Jiao, Wang Zhengzhong, Zhang Fengli, et al. Development and application of frost-heaving fracture

- damage mechanical model for concrete lining channel with arc-bottom trapezoidal at high groundwater level[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2015, 43(1): 213—219. (in Chinese with English abstract)
- [12] 余书超. 保温型刚性护面渠道设计[J]. 农田水利与小水电, 1993(11): 33—35.
- Yu Shuchao. Design for rigid surface canal with thermal insulation[J]. China Rural Water and Hydropower, 1993(11): 33—35. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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-frost in lining channel[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(5): 22—27. (in Chinese with English abstract)
- [14] 安鹏, 邢义川, 张爱军. 基于部分保温法的渠道保温板厚度计算与数值模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 54—62.
- An Peng, Xing Yichuan, Zhang Aijun. Thickness calculation and numerical simulation of insulation board for canal using partial insulation method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(17): 54—62. (in Chinese with English abstract)
- [15] 何武全, 郑水蓉, 沈长越. 渠道防渗防冻胀复合型保温塑料板的试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 39(5): 553—557.
- He Wuquan, Zheng Shuirong, Shen Changyue. Experimental study on composite insulating plastic board of preventing channel seepage and frost heave[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 39(5): 553—557. (in Chinese with English abstract)
- [16] 田淑娟, 王新中, 杨瑞银, 等. 南水北调中线工程渠道设计中 SDM 防渗保温材料摩擦特性试验分析[J]. 水利水电技术, 2005, 36(4): 96—97.
- Tian Shujuan, Wang Xinzong, Yang Ruiyin, et al. Experimental analyses on friction performance of anti-seepage and heat insulating material of SDM in the channel design: Mid-route of South-to-North Water Transfer Project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(4): 96—97 (in Chinese with English abstract)
- [17] 银英姿, 申向东, 步丰湖, 等. 冻土区渠道保温防冻措施对比研究[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2010, 31(4): 209—213.
- Yin Yingzi, Shen Xiangdong, Bu Fenghu, et al. Comparative study on channel frost heave and insulation measures for permafrost region[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition, 2010, 31(4): 209—213. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王文杰, 王正中, 李爽, 等. 季节冻土区衬砌渠道换填措施防冻胀数值模拟[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(6): 83—89.
- Wang Wenjie, Wang Zhengzhong, Li Shuang, et al. Simulation of anti-frozen heave by replace-filling measures for lined canal in seasonal frozen soil region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(6): 83—89. (in Chinese with English abstract)
- [19] 安鹏, 邢义川, 张爱军, 等. 渠道抗冻胀垫层设计方法研究与数值模拟[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 2): 257—264.
- An Peng, Xing Yichuan, Zhang Aijun, et al. Study of design method and numerical simulation for anti-frost heave cushion of canal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Supp.2): 257—264. (in Chinese with English abstract)
- [20] 宋玲, 余书超. 季节冻土区防水卷材防渗渠道的特种衬砌方案研究[J]. 冰川冻土, 2009, 31(1): 124—129.
- Song Ling, Yu Shuchao. On the special scheme for canal liners with rolled waterproof pad in seasonal frozen regions[J]. China Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(1): 124—129. (in Chinese with English abstract)
- [21] 陈立杰, 蔡雪雁, 王正中, 等. 复合土工膜与纳米混凝土衬砌渠道冻胀模拟[J]. 中国农村水利水电, 2010(8): 106—109.
- Chen Lijie, Cai Xueyan, Wang Zhengzhong, et al. Asphalt concrete and polymer cement waterproof material simulation analysis of channels frost heave[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(8): 106—109. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘旭东, 王正中, 闫长城, 等. 基于数值模拟的双层薄膜防渗衬砌渠道抗冻胀机理探讨[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 29—35.
- Liu Xudong, Wang Zhengzhong, Yan Changcheng, et al. Exploration on anti-frost heave mechanism of lining canal with double films based on computer simulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(1): 29—35. (in Chinese with English abstract)
- [23] 余书超, 宋玲, 欧阳辉. 防治混凝土渠道冻胀破坏技术[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2004: 21—48.
- [24] 水利电力部东北勘测设计院科学研究所. 水工建筑物冻害及其防治[M]. 长春: 吉林科学技术, 1990.

Frozen heaving and capacity of frozen heaving resistance of trapezoidal concrete lining canal with water in winter

Song Ling, Ouyang Hui, Yu Shuchao

(College of Water & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: The trapezoidal canal with the anti-seepage and anti-scour concrete lining is widely used in water conveyance project. However, the impervious effect of the canal in the seasonally frozen region doesn't work because the frozen heaving of the bed soil causes the concrete lining damage. The forms of frozen heaving force, which were caused by rigid concrete lining's confining the deformation of the canal bed soil, were analyzed for the different coupled field of temperature and water content in the canal bed soil under atmospheric negative temperature, by means of studying the change of the canal slope length with the formation mechanism of tangential frost-heave force. The conclusion was drawn that if the slope was shorter during frozen period than that during unfrozen period, tangential frost-heave force, pointing to the top end of the slope slab, would act on the undersurface of the concrete lining and vice versa. In fact, there are 2 kinds of frozen states of the bed soil in the section of the canal. One is that the bed soil below the whole concrete lining is frozen, which is mainly presented in the canal used for irrigation. The other is that the bed soil under the part of slope concrete lining is frozen in the canal providing water for city or factory. In the former, normal frozen heaving force acts on the bottom slab while tangential frozen heaving force acts on the slope slab pointing to the bottom of the slope. In the latter, there isn't normal frozen heaving force on the bottom slab but there is tangential frozen heaving force, pointing to the top of slab, under the slope slab above the canal water level. Many results were attained on the damage of concrete lining caused by bed soil's frozen heaving of the whole section, while few researches on the frost damage of the slope slab in the canal delivering water were carried out, and related researches were focused on ice situation, including the numerical simulation and control of ice situation and the analysis on ice condition. So the next research was on the capacity of frozen heaving resistance of concrete lining slab on the slope bed soil of the canal delivering water in winter. The problem of frozen heaving resistance of concrete lining was changed into that of bearing capacity of concrete structure under the action of frozen heaving force. Because slope slab was originally laid on the bed soil and the slope slab and the bottom slab were articulated, and the slope slab was jointless, the mechanical model of the slope concrete slab was established under the combination of the normal and the tangential frozen heaving forces, the gravity of the slope concrete slab, the water pressure and the frictional resistance under the slope concrete slab. The frost damage of the slope concrete slab of the canal carrying water in winter belongs to the problem of being pulled by frozen heaving. After the magnitude of normal force and tangential force of frozen heaving was calculated based on the force equilibrium and the formation mechanism of tangential frost-heaving force, the solution to the frost damage of the trapezoidal canal carrying water in winter was found. The capacity of frozen heaving resistance of the trapezoidal canal carrying water in winter could be calculated in the light of pulling resistance of pile as long as the anti-seepage concrete lining of the trapezoidal canal carrying water in winter was regarded as the pile suffered from frozen heaving force, which non-vertically acted on a part of lateral surface of the pile. So the method to design the concrete lining structure of trapezoidal canal carrying water in winter, whose core is checking the calculation of anti-pulling strength of the slope slab, was successfully founded.

Key words: canals; temperature; moisture; hydro-engineering; seepage-proof canal; frozen-heaving force; introduction of rigid surface layer; checking computation of capacity of rigid surface layer