

基于非对称冻胀破坏的大U形混凝土衬砌渠道力学模型

张茹^{1,2}, 王正中^{1,3}, 陈涛¹, 李甲林^{1,4}, 郭利霞¹

(1 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2 山西水利职业技术学院, 山西 运城 044000;

3 中国科学院 冻土工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 4 甘肃省水利厅, 甘肃 兰州 730000)

【摘要】【目的】科学指导冻土地区大U形混凝土衬砌渠道的设计建设。【方法】针对大U形混凝土衬砌渠道的冻胀机理和冻胀破坏特点,通过适当的假设,建立了大U形混凝土衬砌渠道非对称冻胀破坏的力学模型。【结果】只需选取最大冻结力一个参变量,即可求解渠道衬砌板上的冻胀力,并结合混凝土板抗裂条件,给出内力、胀裂部位、冻胀抗裂板厚及抗冻胀破坏验算等一系列计算方法。【结论】工程实例计算表明,该模型安全合理、简单实用,可为大U形混凝土衬砌渠道防冻胀设计提供科学依据,并为建立其他形式的渠道冻胀破坏力学模型提供参考。

【关键词】 大U形渠道;混凝土衬砌;非对称冻胀破坏;力学模型

【中图分类号】 TV91

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2008)11-0217-07

Establishment and application of mechanic models of dissymmetric frost heaving damage of U-shape canal with concrete lining

ZHANG Ru^{1,2}, WANG Zheng-zhong^{1,3}, CHEN Tao¹, LI Jia-lin^{1,4}, GUO Li-xia¹

(1 College of Water and Construction Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Shanxi Water Technical Professional College, Yuncheng, Shaanxi 044000, China; 3 State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAREERI, CAS, Lanzhou, Gansu 730000, China; 4 Gansu Water Conservancy Department, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: 【Objective】 The study was done for scientific guidance of the canal building in frozen soil areas. 【Method】 In light of U-shape canal with concrete lining of frost heaving mechanism and damage characteristics, through the appropriate assumptions, a mechanic model of dissymmetric frost heaving damage of U-shape canal with concrete lining was established. 【Result】 A parameter of the greatest frost heaving force was chosen, then the frost heaving forces on lining plates was solved. By combining with concrete plates against cracking conditions, a series of calculation methods were given about the internal forces, cracking site, frost heaving against cracking thickness and anti-frost heaving damage checking. 【Conclusion】 The project shows that the model is reasonably safe, simple and practical, providing a scientific basis for the anti-frost heaving designed of U-shape canal with concrete lining and a reference for the establishment of the frost heaving damage mechanic models.

Key words: U-shape canal; concrete lining; dissymmetric frost heaving damage; mechanic model

* [收稿日期] 2007-11-09

[基金项目] 国家冻土工程重点实验室基金项目(9901)

[作者简介] 张茹(1974—),女,山西运城人,讲师,在职硕士,主要从事水工及建筑结构方面的研究。
E-mail: zhang-ru-163@163.com

[通讯作者] 王正中(1963—),男,陕西彬县人,教授,博士生导师,主要从事水工结构工程方面的研究。
E-mail: wangzz0910@yahoo.com.cn

U形渠道是我国 20 世纪 70 年代以来发展起来的一种新型的渠道断面形式,具有水力条件好、占地面积少等诸多优点。30 多年来,不仅中小型 U 形渠道已在全国广泛推广,而且大型 U 形渠(指设计流量大于 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 的 U 形渠道^[1])在不少地区也得到成功应用^[2]。但在东北和华北、西北等冻土地区,渠道冻胀破坏非常普遍,不仅直接制约着工程效益的发挥,而且浪费了宝贵的水资源,如何防治衬砌渠道的冻胀破坏成为一个非常现实的工程问题。目前,渠道衬砌工程的设计主要依据水力学和各地工程的实践经验及构造要求进行,缺乏统一合理的结构设计理论与方法,从而导致冻土地区衬砌渠道因较大冻胀力作用而使衬砌板裂缝、隆起及滑塌等破坏现象非常普遍;但至今规范^[3]中仍无可用于工程的计算方法。尽管对于梯形渠道冻胀破坏的力学模型已有成果^[4-5],但对广泛应用的大 U 形渠道冻胀破坏仍未见科学的设计方法。为此,本研究通过分析冻土地区大 U 形混凝土衬砌渠道冻胀破坏的机理,建立了其冻胀破坏的力学模型,以期为大 U 形及其他形式的混凝土衬砌渠道抗冻胀设计提供参考。

1 大 U 形衬砌渠道冻胀破坏的特征及其原因分析

1.1 冻胀破坏的形式及特征

根据试验研究,梯形渠道由于坡脚处衬砌板的相互约束及其对基土冻胀的约束,冻胀分布很不均匀,邻近坡脚处的冻胀力较大,故在渠坡下部和渠底中部易产生冻胀破坏;小型 U 形衬砌渠道刚度大,整体性好,冻胀量分布均匀,承载能力较强,冻土消融后能恢复原位,不易产生冻胀破坏^[6-9]。与前二者相比,大 U 形混凝土衬砌渠道虽也是 U 形,但由于断面尺寸较大,各部位的坡向不同,日照强度不一,加之土质、水分、风力等条件的差异,以及走向的不同,因而各部位的日照及温度水分状况不同,冻结状态也不同,表现为上部冻深较大,底部冻深较小,阴坡冻深较大,阳坡冻深较小,渠坡底部冻胀量大于上部,冻胀分布不均匀,冻胀方向是从渠侧向里而渠底向上,因渠坡较陡,承受水平冻胀力的能力较弱,累积残余冻胀变形较大,渠底的反拱作用也相对减弱,所以容易产生冻胀破坏。其破坏特征是:(1)既具有梯形渠道渠顶衬砌板受法向冻结力约束的特点,又具有 U 形渠底与渠坡冻胀力分布较均匀的特点;(2)渠道衬砌变位值较大的部位出现在渠道底部和阴坡,阳坡较小或没有,渠道发生整体微小的局部上

抬和朝向阳坡的微小位移及偏转,这与小 U 形渠道相似;(3)与小 U 形渠道相比,衬砌整体刚度较小,但与梯形渠道相比则其整体刚度较大,局部刚度较小;(4)工程实践表明,沿渠道轴线方向,在阴坡直线段与圆弧段相切处冻胀力较大的地方易形成冻胀裂缝。

1.2 冻胀破坏的原因分析

大 U 形混凝土衬砌渠道冻胀破坏的根本原因,一方面是衬砌结构刚度相对较小,抗拉及抗弯能力较差;另一方面是衬砌结构向上位移和向阳坡偏转的冻胀变形被渠床冻土约束,加之衬砌板之间的相互约束,使弧底板成为压弯构件,渠坡直线段成为偏心压弯构件,随着冻胀的加剧,渠顶的法向冻结力和渠侧的切向冻结力逐步加大,使衬砌结构内产生了较大的弯矩和拉应力,当阴坡渠顶的法向冻结力和阳坡坡板的切向冻结力同时达到极限值时,衬砌板的拉应力达到最大,衬砌结构发生冻胀破坏^[4,9-11]。

大 U 形混凝土衬砌渠道是在冻胀力、冻结力及底板与坡板相互约束等作用而发生破坏的,其机理非常复杂,但这些力的大小及方向不是事先已知的恒定值,而是相互依赖的,对于具体的结构,在达到极限破坏状态时,冻胀力、冻结力和混凝土抗拉强度是满足某种关系的。因此在建立力学模型时,要依据以上所述冻胀特征、破坏原因及工程实践经验作出恰当的假设和处理。

2 大 U 形混凝土衬砌渠道冻胀破坏的力学模型

2.1 基本假设及简化

(1)达到极限破坏状态时,冻土及衬砌混凝土均为线弹性材料,结构变形为小变形,可应用迭加原理。

(2)渠床土冻结前已完成固结,不计未冻土的压缩效应。

(3)冻土的弹性模量远小于混凝土的弹性模量,冻土不参与衬砌板的弯曲变形,只对衬砌板施加冻胀力,并提供被动冻结约束。

(4)渠坡衬砌板顶部基土含水量达到起始冻结含水量,或在低温下地下水能补给到渠顶处。

(5)单就渠坡段和渠底段而言,近似为单向冻结,不考虑沿渠道断面周长方向几何形体突变的影响。

(6)法向冻胀力由法向冻胀量产生,在渠坡直线段上线性分布,坡顶最小,坡底达到最大,阴阳两坡的最大法向冻胀力不同,阴坡大而阳坡小,与两坡的

最低负温成比例;法向冻胀力在弧底板上沿弧长线性分布。

(7)依据试验^[8-9]及数值模拟^[12]结果,假设坡板顶部与基土牢固冻结成一体,在该处法向冻胀力达到最大值,切向冻胀力为零;渠坡板直线段与圆弧段相切处的切向冻胀力达到最大值,坡板上的切向冻胀力沿坡长线性分布,弧底切向冻胀力为零。该切向分布冻胀力由使渠槽上抬的法向冻胀力产生并与其平衡(冻胀力为主动动力而冻胀力为被动力)。

(8)渠道阴坡坡顶的最大法向冻胀力与阳坡坡板的最大切向冻胀力同时达到极限状态^[13](指渠道不出现裂缝的正常使用极限状态),数值相等。

(9)整个大 U 形混凝土的衬砌结构可简化为由坡顶法向冻胀力提供约束,承受分布法向冻胀力和切向冻胀力作用的整体拱形薄壳结构。

(10)大 U 形混凝土衬砌结构属薄壳结构,在内力计算时不考虑坡板自重的影响。

2.2 结构计算简图

根据前面基本假设及简化分析,设沿坡板直线

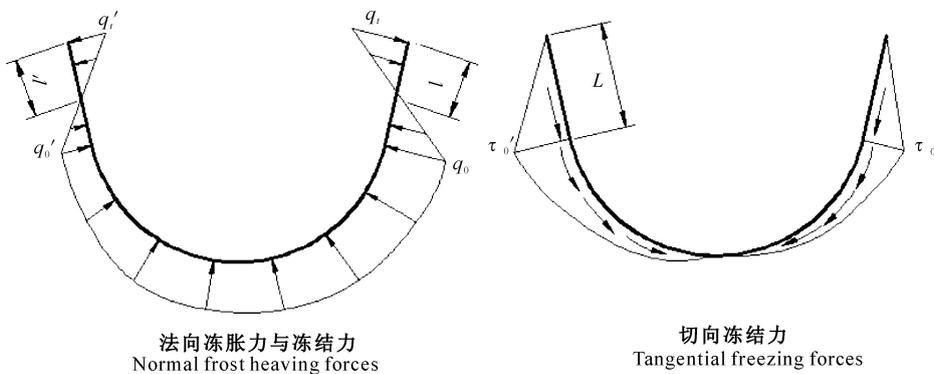


图 2 大 U 形渠冻胀受力简图

Fig. 2 Frost heaving forces diagram of U-shape lining plates

3 大 U 形混凝土衬砌渠道冻胀破坏力学模型的求解

3.1 渠道在冻胀破坏作用下达达到极限平衡状态时 q_0 、 q_t' 和 τ_0 的计算

根据静力平衡条件^[14],由图 2 建立平衡方程,有:

$$\sum X=0 \Rightarrow \frac{l}{2}q_t - \frac{l'}{2}q_t' + \frac{L-l'}{2}q_0' - \frac{L-l}{2}q_0 + (q_0' - q_0)A + (\tau_0' - \tau_0)C = 0; \quad (1)$$

$$\sum Y=0 \Rightarrow -\frac{l}{2}q_t - \frac{l'}{2}q_t' + \frac{L-l'}{2}q_0' - \frac{L-l}{2}q_0 + (q_0 + q_0')D - (\tau_0' - \tau_0)E = 0; \quad (2)$$

段线性分布的法向冻胀力最大值为在阴坡为 q_0 ,在阳坡为 q_0' ,在弧底段从 q_0 到 q_0' 沿弧长线性分布;阴坡坡顶最大法向冻胀力为 q_t ,阳坡坡顶的法向冻胀力为 q_t' ;沿阳坡坡板直线段线性分布的最大切向冻胀力为 τ_0' ,阴坡为 τ_0 ,弧底切向冻胀力为零,两侧沿弧长线性分布。

大 U 形渠道断面如图 1 所示。取单位长度槽壳进行研究,其具体冻胀受力如图 2 所示。

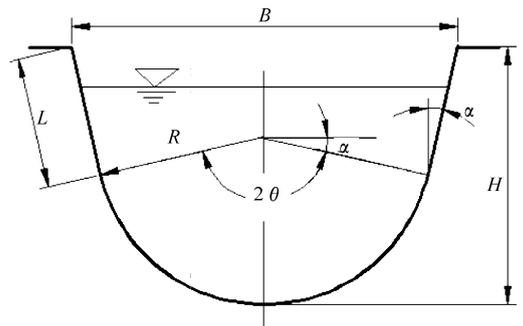


图 1 大 U 形渠断面示意图

Fig. 1 Section of U-shape canal

$$\sum M=0 \Rightarrow \frac{l'(3L-l')}{6}q_t' - \frac{l(3L-l)}{6}q_t + \frac{(L-l)^2}{6}q_0 - \frac{(L-l')^2}{6}q_0' + (\tau_0' - \tau_0)F = 0. \quad (3)$$

式中: $\sum X$ 为各力在水平方向投影的代数和; $\sum Y$ 为各力在竖直方向投影的代数和; $\sum M$ 为各力对 U 形渠弧底板圆心之矩的代数和; L 为渠坡直线段长度; l 和 l' 由冻胀力和冻胀力大小按几何比例计算,冻胀力确定后方可确定;

$$A = R\left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{\tan\theta}\right); C = \frac{L}{2\tan\theta} + \frac{R}{\theta}\left(\theta - \frac{1}{\sin\theta} + \frac{1}{\tan\theta}\right);$$

$$D = R\tan\theta; E = \frac{L\tan\theta}{2} + R\left(\frac{\tan\theta}{\theta} - 1\right); F = \frac{LR}{2} + \frac{R^2\theta}{2};$$

R 为圆弧半径; θ 为二分之一圆心角。

根据前面的假设条件, q_0 和 q_0' 与阴阳两坡的最低负温有关, 其比例关系为:

$$\frac{q_0'}{q_0} = \frac{t'}{t} = n. \quad (4)$$

联解以上 3 个方程, 即可得到 q_0 、 q_0' 和 τ_0 的解, 进一步可计算结构的内力。

3.2 衬砌结构内力的计算^[15]

(1) 渠坡直线段内力。阴、阳坡板取坐标原点在坡顶处, 以单位板长为研究对象, 则阴坡板轴力最大值为:

$$N_{\max} = N_L = \frac{\tau_0 L}{2} \quad (x=L). \quad (5)$$

式中: N_{\max} 为阴坡板轴力最大值, N_L 为阴坡板 $x=L$ 处的轴力。

阴坡板剪力最大值为:

$$Q_{\max} = \frac{q_0' l}{2} \quad (x=l). \quad (6)$$

阴坡板弯矩最大值为:

$$M_{\max} = M_L = \frac{q_0 (L-l)^2}{6} - \frac{q_0' l (3L-l)}{6} - \frac{\tau_0 b L}{4} \quad (x=L). \quad (7)$$

式中: M_{\max} 为阴坡板弯矩最大值, M_L 为阴坡板 $x=L$ 处的弯矩。

阳坡板轴力最大值为:

$$N'_{\max} = N'_L = \frac{\tau_0' L}{2} \quad (x=L). \quad (8)$$

式中: N'_{\max} 为阳坡板轴力最大值, N'_L 为阳坡板 $x=L$ 处的轴力。

阳坡板剪力最大值为:

$$Q'_{\max} = -\frac{q_0' l'}{2} \quad (x=l'). \quad (9)$$

阳坡板弯矩最大值为:

$$M'_{\max} = M'_L = \frac{q_0' (L-l')^2}{6} - \frac{q_0' l' (3L-l')}{6} - \frac{\tau_0' b L}{4} \quad (x=L). \quad (10)$$

式中: M'_{\max} 为阳坡板弯矩最大值, M'_L 为阳坡板 $x=L$ 处的弯矩。

(2) 圆弧底板的内力。以弧底顶点为起点, 设任一圆心角 β ($0 \leq \beta \leq \theta$), 取 $(\theta - \beta)$ 段的圆弧底板为脱离体, 有:

阴坡弧底板轴力为:

$$N_\beta = -Q_L \sin(\theta - \beta) + N_L \cos(\theta - \beta) + N_\tau + N_q \quad (0 \leq \beta \leq \theta). \quad (11)$$

式中: N_τ 和 N_q 分别为阴坡弧底板切向冻结力和法向冻胀力产生的轴力, 有:

$$N_\tau = \frac{\tau_0 R}{\theta} [\theta \sin(\theta - \beta) + \cos(\theta - \beta) - 1]; \quad (12)$$

$$N_q = \frac{q_0 + q_0'}{2} R [1 - \cos(\theta - \beta)] + \frac{q_0 - q_0'}{2\theta} R [-\theta \cos(\theta - \beta) + \sin(\theta - \beta) + \beta]. \quad (13)$$

阴坡弧底板弯矩为:

$$M_\beta = M_L - M_N - M_Q - M_\tau + M_q \quad (0 \leq \beta \leq \theta). \quad (14)$$

式中: M_N 和 M_Q 分别为阴坡板 $x=L$ 处的剪力和轴力产生的弯矩, M_τ 和 M_q 分别为阴坡弧底板切向冻结力和法向冻胀力产生的弯矩; 有:

$$M_N = N_L R [1 - \cos(\theta - \beta)]; \quad (15)$$

$$M_Q = Q_L R \sin(\theta - \beta); \quad (16)$$

$$M_\tau = \frac{\tau_0 R^2}{\theta} \left[\frac{\theta^2 - \beta^2}{2} - \theta \sin(\theta - \beta) - \cos(\theta - \beta) + 1 \right]; \quad (17)$$

$$M_q = \frac{q_0 + q_0'}{2} R^2 [1 - \cos(\theta - \beta)] + \frac{q_0 - q_0'}{2\theta} R^2 [\beta + \sin(\theta - \beta) - \theta \cos(\theta - \beta)]. \quad (18)$$

阳坡弧底板轴力为:

$$N'_\beta = Q'_L \sin(\theta - \beta) + N'_L \cos(\theta - \beta) + N'_\tau + N'_q \quad (0 \leq \beta \leq \theta). \quad (19)$$

式中: N'_τ 和 N'_q 分别为阳坡弧底板切向冻结力和法向冻胀力产生的轴力, 有:

$$N'_\tau = \frac{\tau_0' R}{\theta} [\theta \sin(\theta - \beta) + \cos(\theta - \beta) - 1]; \quad (20)$$

$$N'_q = \frac{q_0 + q_0'}{2} R [1 - \cos(\theta - \beta)] - \frac{q_0 - q_0'}{2} R [-\theta \cos(\theta - \beta) + \sin(\theta - \beta) + \beta]. \quad (21)$$

阳坡弧底板弯矩为:

$$M'_\beta = M'_L - M'_N + M'_Q - M'_\tau + M'_q \quad (0 \leq \beta \leq \theta). \quad (22)$$

式中: M'_N 和 M'_Q 分别为阳坡板 $x=L$ 处的剪力和轴力产生的弯矩, M'_τ 和 M'_q 分别为阳坡弧底板切向冻结力和法向冻胀力产生的弯矩; 有:

$$M'_N = N'_L R [1 - \cos(\theta - \beta)]; \quad (23)$$

$$M'_Q = Q'_L R \sin(\theta - \beta); \quad (24)$$

$$M'_\tau = \frac{\tau_0' R^2}{\theta} \left[\frac{\theta^2 - \beta^2}{2} - \theta \sin(\theta - \beta) - \cos(\theta - \beta) + 1 \right]; \quad (25)$$

$$M'_q = \frac{q_0 + q_0'}{2} R^2 [1 - \cos(\theta - \beta)] - \frac{q_0 - q_0'}{2\theta} R^2 [\beta + \sin(\theta - \beta) - \theta \cos(\theta - \beta)]. \quad (26)$$

衬砌板内力分布规律如图 3 所示。

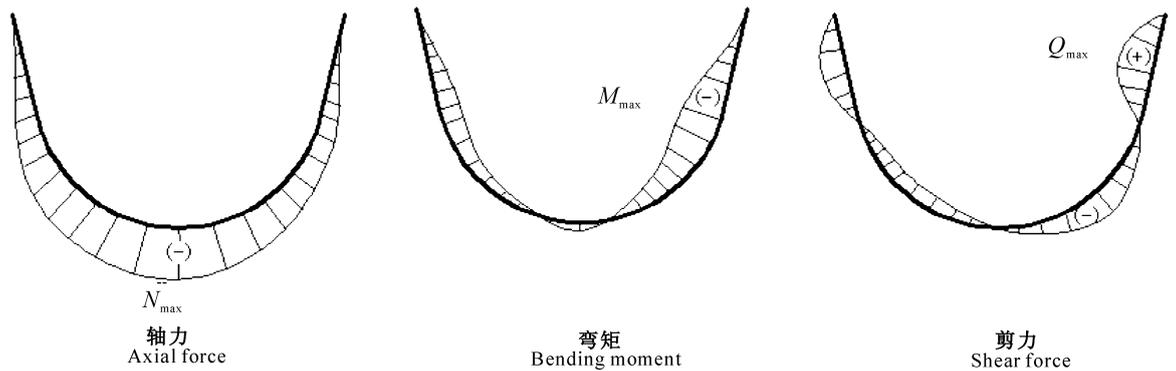


图 3 衬砌板内力分布图

Fig. 3 Internal forces diagram of lining plates

3.3 衬砌板厚度的验算

一般剪力不会导致衬砌板胀裂破坏,混凝土衬砌板的胀裂与否,取决于衬砌板弯矩最大部位的最大拉应变是否超过其允许拉应变^[16]。

(1)渠坡直线段。渠坡直线段属偏压组合变形问题,最大拉应力在最大弯矩所在位置,即阴坡板的最大弯矩部位,当该处的板厚 b 满足抗裂要求时,则渠坡直线段其他部位亦满足抗裂要求。阴坡最大弯矩部位在直线段与弧底相切处 ($x=L$),此处的弯矩和轴力为:

$$M_L = \frac{q_0(L-l)^2}{6} - \frac{q_t l(3L-l)}{6} - \frac{\tau_0 b L}{4}; \quad (27)$$

$$N_L = \frac{\tau_0 L}{2}. \quad (28)$$

最大拉应力为:

$$\sigma^- = \frac{6M_L}{b^2} - \frac{N_L}{b}. \quad (29)$$

验算抗裂条件为:

$$\frac{\sigma^-}{E_c} \leq \epsilon_{t1}. \quad (30)$$

工程中如不满足抗裂要求,就应采取冻胀破坏的防治措施。

(2)弧底板。衬砌结构弧底板属压弯组合变形问题,弯矩最大的部位在阴坡靠近直线段处,具体位置应通过计算来确定。

最大拉应力为:

$$\sigma^- = \frac{6M_{\max}}{b^2} - \frac{N_{\beta}}{b}. \quad (31)$$

验算抗裂条件为:

$$\frac{\sigma^-}{E_c} \leq \epsilon_{t1}. \quad (32)$$

同理,工程中如不满足抗裂要求,就应采取冻胀

破坏的防治措施。

实际上,混凝土衬砌渠道冻胀过程是动态的,即渠床基土是在刚性混凝土衬砌的约束下产生冻结力和冻胀力的,这种冻胀受衬砌结构的约束和抑制,会使法向冻胀量降低。因此,以上按弹性理论及迭加法所求得的法向冻胀力显然是偏大偏安全的。

4 应用举例

有关最大法向冻结力 q_t 和切向冻结力 τ_0' 的计算,不仅与土壤特性、土壤水分含量和地下水的补给有关,而且与温度状况有关,其取值可根据当地水文气象及地质情况具体确定,在无资料情况下对 -20 °C 以内的负温,可按以下经验公式计算^[17]:

$$q_t = \tau_0' = c + mt. \quad (33)$$

式中: t 为负温的绝对值; c 、 m 为与土质有关的系数,其中 $c=0.3 \sim 0.6$ kPa, $m=0.4 \sim 1.5$ kPa/°C; 土壤粘粒含量越大、冻结速率越快、有地下水补给、土壤含水率越大时, c 、 m 取值越大。

例:宝鸡峡塬下北干渠大 U 形混凝土衬砌渠道的渠深 $H=3.77$ m,渠口宽 $B=6.9$ m,弧底半径 $R=3.0$ m,圆心角 $2\theta=141.3^\circ$,渠坡直线段倾角 $\alpha=19.35^\circ$,衬砌板厚 $b=0.1$ m,采用喷射混凝土施工,强度为 C20。渠床土壤为中壤土,按当地年降雨量,渠堤土壤含水量达到初始冻结含水量,地下水位埋深在 20 m 以下,阴坡冻土层的最低温度 $t=-15$ °C,阳坡冻土层的最低温度 $t'=-12$ °C,判断该衬砌结构是否会发生冻胀破坏及可能胀裂的部位。

(1)由题目已知条件可求出 C20 混凝土的弹性模量及极限拉应变,据参考文献[16]附录二表 2 可得: $E_c=2.6 \times 10^4$ MPa, $\epsilon_{t1}=1 \times 10^{-4}$ 。

(2)计算最大冻结力。取 $c=0.4 \text{ kPa}$, $m=0.4 \text{ kPa}/^\circ\text{C}$, 则有:

$$q_t = \tau_0' = c + mt = 0.4 + 0.4 \times 15 = 6.4 \text{ kPa}.$$

(3)求解各冻胀作用力。联解式(1)、(2)、(3) 3个平衡方程,可得 $q_0 = 5.43 \text{ kPa}$, $q_0' = 4.34 \text{ kPa}$, $\tau_0 = 6.16 \text{ kPa}$, $q_t' = 4.12 \text{ kPa}$ 。

计算所得的阴阳两坡冻胀力数值不相同,这与阴阳两坡的温度状况不同有关,符合实际情况。

(4)求解各内力。在阴坡直坡段 $x=L$ 处, $N_L = 5.76 \text{ kN}$, $M_L = -4.52 \text{ (kN} \cdot \text{m)/m}$ (内侧拉)。

经计算,最大弯矩在阴坡弧形板 $\beta=65^\circ$ 处,有 $N_\beta = 7.41 \text{ kN}$, $M_{\max} = -4.67 \text{ (kN} \cdot \text{m)/m}$ (内侧拉)。

在阴坡弧形板 $\beta=45^\circ$ 处,有 $N_{45^\circ} = 12.91 \text{ kN}$, $M_{45^\circ} = -3.35 \text{ (kN} \cdot \text{m)/m}$ (内侧拉)。

在弧底 $\beta=0$ 处,有 $N_0 = 18.97 \text{ kN}$, $M_0 = 0.99 \text{ (kN} \cdot \text{m)/m}$ (外侧拉)。

在阳坡直坡段 $x=L$ 处,有 $N_L' = 5.98 \text{ kN}$, $M_L' = -2.89 \text{ (kN} \cdot \text{m)/m}$ (外侧拉)。

可见,渠道的弯矩较大部位在阴坡直线段与弧底相切处附近稍偏下,此处轴力数值又较小,容易破坏;弧底内侧受压,不易开裂,反拱作用明显。

(5)判断衬砌结构冻胀破坏及胀裂部位。在阴坡弧形板 $\beta=65^\circ$ 处弯矩最大,是最危险断面,其拉应力及应变为:

$$\sigma^- = \frac{6M_{\max}}{b^2} - \frac{N_\beta}{6} = 2\,727 \text{ kPa};$$

$$\epsilon_l = \frac{\sigma^-}{E_c} = \frac{2\,727}{2.6 \times 10^7} = 1.05 \times 10^{-4}.$$

而衬砌板的极限拉应变为 1×10^{-4} , 计算结果稍偏大,可以判断该渠道在冻胀作用下,阴坡弧形板 $\beta=65^\circ$ 处会出现微小的裂缝,建议工程中对该渠道进行适当的加强处理,即可达到安全目的。实际上,该工程施工时就对渠道采取了加肋处理,运行二十几年来情况一直良好。

5 结 论

1)通过以上分析,本研究建立了大 U 形混凝土衬砌冻胀破坏的力学模型,据此结合有关几何、物理、力学参数及指标就可以进行衬砌结构的设计,主要包括最大法向冻胀力计算公式、最大弯矩计算公式、渠坡板及弧底板抗裂计算公式等,而且各计算公式与复杂的冻土物理力学指标没有直接关系,仅仅与最大冻结力有关。这样,就可避免通过大量复杂

的室内外试验确定冻土的各种物理、力学指标。实际上冻土的各种物理力学指标的变异性、随机性很大,这使以往建立在经验基础上的盲目设计很难达到科学合理的要求。而本文所提出的计算方法,只要根据有关冻土土质、水分及温度状况确定最大冻结力,再结合渠道几何要素及衬砌材料的力学指标,就能计算出各控制内力及应力,并能判断是否发生胀裂及破坏,从而使这一复杂问题简单化、量化。

2)最大冻结力越大,求得的法向冻胀力就越大,混凝土衬砌板越易发生胀裂,这其中综合包含了负温、土质、水分等状况的影响。温度越低、地下水位越高、土壤粘性越大,衬砌板越易发生冻胀破坏。

3)衬砌结构的弯矩分布特点是:在阴坡直线段和圆弧段切点附近弯矩值较大,这与工程实际中出现的裂缝位置吻合^[2];弧底段的弯矩内压外拉,说明圆弧形底部的刚性衬砌层内受压应力作用不易开裂,较梯形渠道受力条件好。

4)渠道越深,半径越小,法向冻胀力就越大,渠道侧壁承受的拉应力也就越大,与小 U 形相比整体性差。因此,在一定的过流量下,应尽量采用宽浅断面,采用较大的半径,降低直线段高度,来增加圆弧部分的刚度,改善结构受力条件,同时使圆心以上水深减小,水力条件更趋最佳水力断面,并且有利于边坡稳定且便于施工脱模。

本研究所建力学模型,冻胀力大小主要考虑了基土温度、土质等因素,未考虑衬砌体刚度的影响,实际上衬砌体变形的刚度越大,冻胀力就越大,反之越小;计算选取最大冻结力 1 个参变量,便于操作,且计算结果与实际基本吻合,有一定的实用性。但关于最大冻结力的取值,还需要进行详细的室内外研究。

[参考文献]

- [1] 中华人民共和国水利部. 渠道防渗工程技术规范 SL18-2004 [S]. 北京:中国水利水电出版社,2004:182-183.
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Technique specification for seepage prevention engineering on canal SL18-2004 [S]. Beijing:China Waterpower Press, 2004:182-183. (in Chinese)
- [2] 山西省渠道防渗工程技术手册编委会. 山西省渠道防渗工程技术手册 [M]. 太原:山西科学技术出版社,2003:219-248.
Editorial Committee of Manual for Engineering Technique of Seepage Prevention on Canal of Shanxi Province. Manual for engineering technique of seepage prevention on canal of Shanxi province [M]. Taiyuan:Shanxi Science and Technology Press, 2003:219-248. (in Chinese)

- [3] 中华人民共和国水利部. 渠系工程抗冻胀设计规范 SL23-2006 [S]. 北京:中国水利水电出版社,2006:15-17.
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Design code for anti-frost-heave of canal and its structure SL23-2006 [S]. Beijing: China Waterpower Press, 2006: 15-17. (in Chinese)
- [4] 王正中. 梯形渠道混凝土衬砌冻胀破坏的力学模型研究 [J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 24-29.
Wang Z Z. Establishment and application of mechanics models of frost heaving damage of concrete lining trapezoidal open canal [J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(3): 24-29. (in Chinese)
- [5] 陈 涛. 混凝土衬砌渠道冻胀破坏力学模型及应用 [D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2004.
Chen T. Establishment and application of mechanics models of frost heaving damage of concrete lining open canal [D]. Yangling, Shannxi: Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2004. (in Chinese)
- [6] 陈 涛, 王正中, 张爱军. 大 U 形渠道冻胀机理试验研究 [J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(2): 8-11.
Chen T, Wang Z Z, Zhang A J. The test for frost heaving damage mechanism in U-shape channel [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2006, 25(2): 8-11. (in Chinese)
- [7] 李学军, 费良军, 穆红文. U 形衬砌渠道冻胀机理与防渗技术研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(3): 194-199.
Li X J, Fei L J, Mu H W. The study of frost-heave mechanism and seepage technical control on U canal [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(3): 194-199. (in Chinese)
- [8] 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): 5-16.
Li A G, Chen R J, Du Y J, et al. The stimulation test of frost heaving for canal with concrete lining and mechanical analysis [J]. Technique of Seepage Control, 2000, 6(1): 5-16. (in Chinese)
- [9] 李安国. 大 U 形混凝土渠道的冻结、冻胀及冻胀力 [C]// 第三届全国冻土学术会议组委会. 第三届全国冻土学术会议论文集. 北京: 科学出版社, 1989: 314-322.
Li A G. Freeze, heave and frost heaving force of U-shape canal with concrete lining [C]// The Third Session Nation Academic Conference Organization Committee. Collection of the third session nation academic conference. Beijing: Science Press, 1989: 314-322. (in Chinese)
- [10] 王俊发, 马 旭, 周海波. 混凝土衬砌渠道冻胀破坏的机理及力学分析 [J]. 佳木斯大学学报: 自然科学版, 2006, 24 (2): 308-311.
Wang J F, Ma X, Zhou H B. The failure mechanism of canal lining caused by frozen and its mechanical analysis [J]. Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition, 2006, 24 (2): 308-311. (in Chinese)
- [11] 王 庆, 陈燕华. 寒区混凝土衬砌冻害的受力分析与板厚计算 [J]. 中国农村水利水电, 2003(11): 67-68.
Wang Q, Chen Y H. Stress analysis and computation of concrete lining plates in cold areas [J]. China Rural Water and Hydropower, 2003(11): 67-68. (in Chinese)
- [12] 张 茹. 大 U 形混凝土衬砌渠道冻胀破坏力学模型及数值模拟 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
Zhang R. Establishment of mechanics models and numerical stimulation of frost heaving damage of U-shape canal with concrete lining [D]. Yangling, Shannxi: Northwest A&F University, 2007. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国建设部. 混凝土结构设计规范 GB50010-2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 15-16.
The Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures GB50010-2002 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2002: 15-16. (in Chinese)
- [14] 李舒瑶, 赵云翔. 工程力学 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002: 31-50.
Li S Y, Zhao Y X. Engineering Mechanics [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservation Press, 2002: 31-50. (in Chinese)
- [15] 张大伦, 李宗璐. 材料力学: 上册 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1987: 203-246.
Zhang D L, Li Z R. Materials of mechanics; Volume one [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1987: 203-246. (in Chinese)
- [16] 河海大学, 大连理工大学, 西安理工大学, 等. 水工钢筋混凝土结构学 [M]. 3 版. 北京: 中国水利电力出版社, 1996: 158-182.
Hehai University, Dalian University of Technology, Xi'an University of Technology, et al. Reinforced concrete structures of water conservancy project [M]. The Third Edition. Beijing: China Waterpower Press, 1996: 158-182. (in Chinese)
- [17] H A 崔托维奇. 冻土力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1985: 25-28.
H A Cuitovey чудесное. Frozen Soil Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1985: 25-28. (in Chinese)