

网络出版时间:2014-12-12 09:30

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.01.024

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20141212.0930.024.html

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

石 娇¹,王正中^{1,2},张丰丽¹,肖 旻¹,李 爽¹,杨晓松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 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室,甘肃 兰州 730000)

[摘 要] **【目的】**在线弹性断裂力学的基础上,对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进行研究,为弧底梯形衬砌渠道的设计提供依据。**【方法】**将高地下水位弧底梯形渠道混凝土衬砌简化为简支梁结构并建立其冻胀力学模型,在考虑材料本身缺陷的基础上结合断裂力学理论,提出了高地下水位弧底梯形渠道冻胀断裂破坏力学模型。运用断裂力学及结构力学等相关理论,考虑法向冻胀力的作用,通过适当的简化计算弧底梯形渠道衬砌的相关内力,并提出适用于弧底梯形渠道衬砌的断裂力学破坏准则,利用计算实例对所建立的渠道冻胀断裂破坏力学模型进行验证。**【结果】**渠道衬砌板的冻胀断裂符合 I-II 复合型裂纹的特点,通过建立的弧底梯形渠道混凝土冻胀断裂力学模型,可以计算出渠道阴坡、阳坡、渠底的衬砌板厚度。计算实例证明,所建立的高地下水位弧底梯形渠道冻胀断裂破坏力学模型正确可行、简单实用。**【结论】**弧底梯形混凝土衬砌渠道优于梯形渠道,是一种冻胀力及冻胀变形较小的结构形式。

[关键词] 弧底梯形渠道;高地下水位;混凝土衬砌;冻胀破坏;断裂力学模型

[中图分类号] TV554⁺.140.1

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2015)01-0213-07

Development and application of frost-heaving fracture damage mechanical model for concrete lining channel with arc-bottom trapezoidal at high groundwater level

SHI Jiao¹, WANG Zheng-zhong^{1,2}, ZHANG Feng-li¹, XIAO Min¹,

LI Shuang¹, YANG Xiao-song¹

(1 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAS, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: **【Objective】**Based on the liner elastic fracture mechanics, this study explored the frost heave fracture damage mechanical model of arc bottom trapezoidal concrete lining channel at the high underground water level, aimed provide to improve the design of arc bottom trapezoidal channel lining. **【Method】**The concrete lining of high groundwater level arc bottom trapezoidal channel was simplified for the simply supported beam structure and established the frost-heaving mechanical model. Considering the defect of material and combining with the fracture mechanics theory presenting the high groundwater level arc bottom trapezoidal channel frost-heaving fracture damage mechanical model. Using the theory of the fracture

[收稿日期] 2013-09-03

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51279168);国家科技支撑计划项目(2012BAD10B02);冻土工程国家重点实验室项目(SKLFSE-201105);陕西水利科技专项(SXSL2011-03);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20120204110024)

[作者简介] 石 娇(1989—),女,山西临汾人,在读硕士,主要从事冻土工程及渠道冻胀研究。E-mail:shijiao89@sina.com

[通信作者] 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及冻土工程研究。

E-mail:wangzz0910@163.com

mechanics and structural mechanics and considering the normal freezing force, relevant internal forces of arc bottom trapezoidal channel lining were calculated through appropriate simplification and the failure criterion suitable for fracture mechanics of arc bottom trapezoidal channel lining was proposed. The frost-heaving fracture mechanical model was also evaluated using numerical example. 【Result】 Channel lining plate frost heave fracture fit the I-II complex style fracture, and the lining plate thickness of channel shady slope, sunny slope and channel bottom could be calculated using the established arc bottom trapezoidal channel concrete frost-heaving fracture mechanical model. Calculation examples proved the frost-heaving fracture damage mechanical model for arc-bottom trapezoidal channel at high groundwater level was correct practicable simple and useful. 【Conclusion】 Arc bottom trapezoidal concrete lining channel was structure with small frost heaving force and frost heave deformation was superior to the trapezoidal channel.

Key words: arc bottom trapezoidal channel; high groundwater level; concrete lining; frost-heaving damage; fracture mechanical model

水是人类赖以生存的物质基础,水资源匮乏已成为制约我国经济发展的因素之一,一方面是农业缺水,而另外一方面是用 水浪费现象普遍存在。在我国占农业用水 90% 的灌溉用水,其利用效率仅仅只有 40%~50%,而发达国家已达到 70%~80%,其中渠道渗漏损失就占到农业用水的 45%。为了减少渗漏、防止渠道冲刷、节省耕地和改善水流条件,众多科研单位及专家深入研究,并已取得了一些研究成果^[1-4]。世界各国广泛采用各种形式的混凝土衬砌渠道,在渠道断面形式上,从以前单一的梯形断面向弧底梯形及 U 型渠道过渡^[5]。与一般的梯形渠道相比,弧底梯形渠道不仅整体性强,而且水流条件好、输沙能力强,最重要的是弧底梯形结构受力条件好、冻胀力分布均匀、抗冻胀性能好,同时其结构复位能力强、工程耐久性强,因而成为旱寒灌区混凝土衬砌公认的抗冻胀首选断面之一。王正中等^[6]将弧底梯形混凝土结构简化为薄壳拱形结构,提出了弧底梯形的冻胀力学模型。本研究将基于断裂力学理论建立高地下水位弧底梯形衬砌渠道的冻胀破坏力学模型。

裂缝是混凝土结构最常见的缺陷之一,其对建筑物的危害特别大,严重的裂缝会恶化结构应力状态,破坏其整体性和抗渗性,危害建筑物的安全运行。混凝土衬砌体属于刚性材料,由于材料属性和施工方面的原因,材料在施工前就存在着裂缝,这些缺陷的存在显著降低了结构材料的实际强度。混凝土衬砌板的冻胀破坏是在法向冻胀力、法向冻结力、切向冻结力等一系列力的共同作用下发生的,在这一过程中,由于材料本身的缺陷或裂纹的存在,其会在这些力的作用下失稳扩展,最终导致衬砌或结构的破坏,所以建立相应的冻胀断裂力学模型非常必

要。尽管已经建立了梯形断面混凝土衬砌的冻胀断裂力学模型,但是对于北方旱寒地区广泛应用的弧底梯形渠道,目前尚未见与之相适应的冻胀断裂力学模型。为此,本研究在前人研究的基础上^[7],考虑了材料本身的缺陷,依据断裂力学及结构力学的知识和理论,对地下水位能补给到渠顶时的弧底梯形渠道进行了进一步的受力分析和研究,提出了高地下水位弧底梯形渠道的冻胀断裂力学模型,在模型中,将混凝土衬砌板的冻胀看作 I-II 复合型裂纹的扩展问题,然后再考虑渠坡板法向冻结力作用点的位置并将渠坡板看作是简支梁,然后运用高等数学知识对弧底梯形进行一系列的精确运算,使模型更趋于完善,以期为实际工程中梯形渠道衬砌体的设计与建设提供参考依据。

1 渠道衬砌混凝土板的断裂准则

对于混凝土衬砌板来说,裂纹的扩展必将影响衬砌结构的稳定。因此,本研究应用断裂力学的理论和方法研究混凝土衬砌材料的破坏行为,即建立广义强度破坏准则。在引进破坏准则之前,先引进断裂韧度(K_{fi})作为广义强度指标,研究混凝土衬砌板的“破坏”行为。对于渠道衬砌板来说,“破坏”主要是指基础及上部结构由冻胀力引起的破坏。因此,其状态一般又可以表示为^[8]: $K_{fi} < K_{fic}$,不破坏; $K_{fi} = K_{fic}$,临界状态; $K_{fi} > K_{fic}$,破坏。其中 K_{fi} 为渠道混凝土板(界面、基础、上部或地下结构物)的应力强度因子; K_{fic} 为渠道混凝土衬砌板(界面、基础、上部或地下结构物)的断裂韧度; i 为 I、II、III,分别表示混凝土衬砌板发生的是 I 型破坏(张拉型)、II 型破坏(剪切型)、III 型破坏(压裂型)。

对于混凝土衬砌板来说,同时存在法向冻胀力

和切向冻胀力。因此,其破坏包括Ⅰ型和Ⅱ型 2 种,属于Ⅰ-Ⅱ复合型断裂问题,对这种复合型断裂形式试验表明其断裂准则可以采用椭圆形,且具有转轴特性^[9],其表达式为:

$$K_{fI} + K_{fII} \geq K_{fIc} \quad (1)$$

本研究首先建立弧底梯形衬砌体在各种冻胀力作用下的冻胀力学模型;其次,将冻胀力学模型和断裂力学理论相结合,再建立新的弧底梯形渠道冻胀断裂力学模型。

2 高地下水位弧底梯形混凝土衬砌渠道的冻胀力学模型

从理论上讲,渠坡板法向冻结力的作用点应在靠近渠坡板顶部下方,以往的研究中大都近似认为法向冻结力的作用点在渠坡板顶端,这使得计算结果误差很大,模型有失准确^[6-7]。所以本研究取法向冻结力作用点在渠坡板距渠顶 $l/5$ (其中 l 表示渠坡板的长度)处^[10];渠坡板初始裂纹可能出现在衬砌板的任何一个位置,本研究取裂纹最易扩展的部位,即距渠坡板底部 $(\frac{1}{3} \sim \frac{1}{4})l$ 处;根据工程经验,弧底板初始裂纹大多出现在弧底中心点处。本研究将阴阳坡初始裂缝取在距渠坡板底部 $\frac{1}{3}l$ 处^[11-13],渠底取在弧底中心处^[12-13]。弧底梯形渠道混凝土衬砌断面如图 1 所示,渠坡长为 l ,弧半径为 r ,衬砌板厚度为 b ,坡脚角度为 α ,弧底中心角为 2α , $\frac{b}{l}$ 的范围一般为 $(\frac{1}{8} \sim \frac{1}{12})$,本研究取 $\frac{1}{8}$ ^[7]。

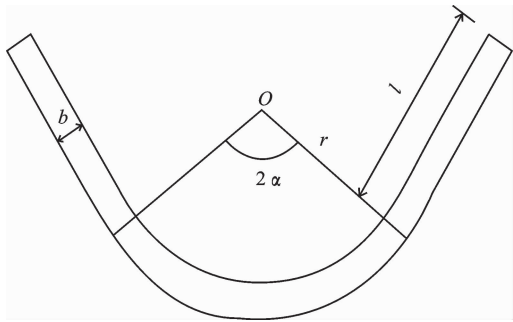


图 1 弧底梯形混凝土衬砌断面示意图

Fig. 1 Concrete lining section of arc bottom trapezoidal

2.1 渠坡板冻胀力学模型

弧底梯形混凝土衬砌渠坡板的计算简图如图 2 所示。

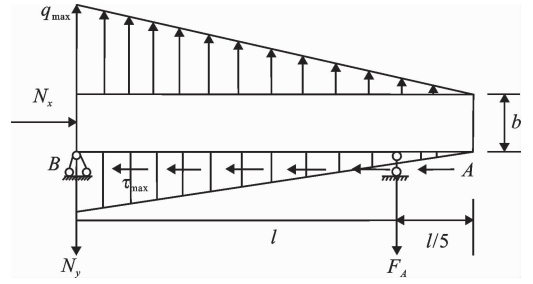


图 2 弧底梯形混凝土衬砌渠坡板的受力分析简图
Fig. 2 Stress analysis for canal slope plate with arc bottom trapezoidal concrete lining

由图 2 可知,渠坡板的内力可以表示为:

$$F_A \cdot \frac{4l}{5} - \frac{1}{2}q_{\max} \cdot \frac{1}{3} + \frac{1}{2}\tau_{\max} \cdot \frac{b}{2} = 0, \quad (2)$$

$$F_A = \frac{5}{24}q_{\max}l - \frac{5}{16}\tau_{\max}b, \quad (3)$$

$$N_y = \frac{7}{24}q_{\max}l + \frac{5}{16}\tau_{\max}b, \quad (4)$$

$$N_x = \frac{1}{2}\tau_{\max}l. \quad (5)$$

式中: F_A 为距离 A 点 $\frac{l}{5}$ 处渠床基土对坡板施加的法向冻结力的合力^[10], $q_{\max}$ 为沿坡板线性分布的法向冻胀力的最大值, $\tau_{\max}$ 为切向冻胀力最大值, b 为渠坡板的厚度, N_x 为由于底板上抬而产生的沿板面方向的顶推力, N_y 为 B 点来自于底板的约束。

裂缝出现在渠坡板距渠底部 $\frac{1}{3}l$ 处,其局部受力计算简图如图 3 (其中 q 为 $\frac{2}{3}l$ 处的法向冻胀力, τ 为 $\frac{2}{3}l$ 处的切向冻胀力, M 为渠坡板距弧底板 $\frac{1}{3}l$ 处初始裂缝部位的弯矩, Q 为渠坡板距弧底板 $\frac{1}{3}l$ 处初始裂缝部位存在的剪力)所示。

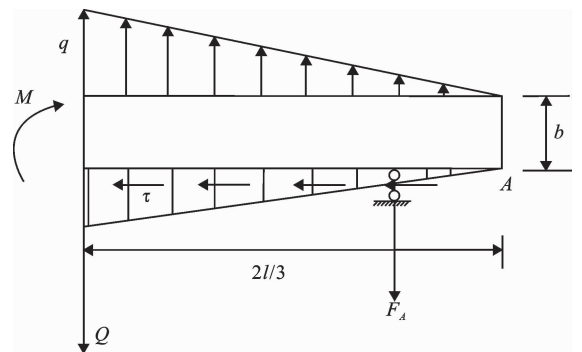


图 3 裂缝出现部位的局部受力分析简图

Fig. 3 Local stress analysis for crack

由图 3 可知,对渠坡板距弧底板 $\frac{1}{3}l$ 处初始裂缝部位的弯矩 M ,有关系式:

$$F_A\left(\frac{2}{3}l-\frac{1}{5}l\right)+\frac{1}{2}\cdot\frac{2}{3}\tau_{\max}\cdot\frac{2}{3}l\cdot\frac{b}{2}-\frac{1}{2}\cdot\frac{2}{3}q_{\max}\cdot\frac{2}{3}l\cdot\frac{1}{3}\cdot\frac{2}{3}l+M=0, \quad (6)$$

$$M=-\frac{31}{648}q_{\max}l^2+\frac{5}{144}\tau_{\max}bl. \quad (7)$$

对渠坡板距弧底板 $\frac{1}{3}l$ 处初始裂缝部位的剪力 Q ,有关系式:

$$Q=\frac{1}{2}\cdot\frac{2}{3}q_{\max}\cdot\frac{2}{3}l-F_A=\frac{1}{72}q_{\max}l+\frac{5}{16}\tau_{\max}b. \quad (8)$$

2.2 弧底板的冻胀力学模型

弧底板的受力分析简图如图 4 所示。

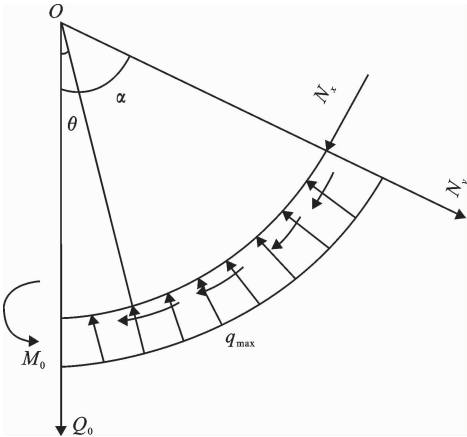


图 4 弧底板的受力分析简图

Fig. 4 Stress analysis for arc slab

从弧底板中心取一任意角 θ ,则 θ 处的弯矩为:

$$\sum M=0, \quad (9)$$

$$N_y r \sin (\alpha-\theta)+N_x[r-r \cos (\alpha-\theta)]+\int_{\theta}^{\alpha} \frac{\theta}{\alpha} \tau_{\max }[r-r \cos (\alpha-\theta)] r d \theta-\int_{\theta}^{\alpha} q_{\max } r[\sin (\alpha-\theta)] r d \theta-M_{\theta}=0, \quad (10)$$

$$\int_{\theta}^{\alpha} \frac{\theta}{\alpha} \tau_{\max }[r-r \cos (\alpha-\theta)] r d \theta=\frac{\tau_{\max } r^2}{\alpha} \cdot\left[\frac{\alpha^2-\theta^2}{2}-\theta \sin (\alpha-\theta)+\cos (\alpha-\theta)-1\right], \quad (11)$$

$$\int_{\theta}^{\alpha} q_{\max } r[\sin (\alpha-\theta)] r d \theta=q_{\max } r^2[1-\cos (\alpha-\theta)]. \quad (12)$$

式中: r 为弧半径, α 为坡脚角度, M_{θ} 为弧底板任意角 θ 处的弯矩。

弧底板任意角 θ 处的剪力 Q_{θ} 为:

$$\sum Y=0, \quad (13)$$

$$Q_{\theta}-\int_{\theta}^{\alpha} \frac{\theta}{\alpha} \tau_{\max }[\sin (\alpha-\theta)] r d \theta-N_y \cos (\alpha-\theta)-N_x \sin (\alpha-\theta)+\int_{\theta}^{\alpha} q_{\max } r \cos (\alpha-\theta) d \theta=0, \quad (14)$$

$$\int_{\theta}^{\alpha} \frac{\theta}{\alpha} \tau_{\max }[\sin (\alpha-\theta)] r d \theta=\frac{\tau_{\max } r}{\alpha}[\alpha-\theta \cos (\alpha-\theta)-\sin (\alpha-\theta)], \quad (15)$$

$$\int_{\theta}^{\alpha} q_{\max } r \cos (\alpha-\theta) d \theta=q_{\max } r \sin (\alpha-\theta). \quad (16)$$

对于弧底板中心, θ 取为 0。则有:

$$M_0=N_y r \sin \alpha+2 N_x r \cdot \sin ^2 \frac{\alpha}{2}+\frac{\tau_{\max } r^2}{\alpha} \cdot\left(\frac{\alpha^2}{2}+\cos \alpha-1\right)-2 q_{\max } r \sin ^2 \frac{\alpha}{2}, \quad (17)$$

$$Q_0=\frac{\tau_{\max }}{\alpha} \cdot r(\alpha-\sin \alpha)+N_y \cos \alpha+N_x \sin \alpha-q_{\max } r \sin \alpha. \quad (18)$$

式中: M_0 为弧底板中心处的弯矩; Q_0 为弧底板中心处的剪力。

3 弧底梯形混凝土衬砌板冻胀断裂力学模型

3.1 渠坡板断裂力学模型

混凝土衬砌渠道是法向冻胀力、切向冻结力、法向冻结力等一系列力相互共同作用的体系,其破坏既包括了张拉型,又包括了剪切型,所以属于 I-II 复合型断裂力学问题,所选取的断裂力学准则如式 (1)所示。取其临界条件,有:

$$K_{f I}+K_{f II}=K_{f I c} . \quad (19)$$

其中,对 $K_{f I}$,有:

$$K_{f I}=\frac{6 M}{b^2} \sqrt{\pi s} F\left(\frac{s}{b}\right) . \quad (20)$$

式中: M 为渠坡板距弧底板 $\frac{1}{3}l$ 处初始裂缝部位的弯矩; s 为初始裂缝长度; F 为裂缝长度 s 和渠坡板厚度 b 的函数式^[14],其具体表达式为:

$$F\left(\frac{s}{b}\right)=1.122-1.4 \times\left(\frac{s}{b}\right)+7.33 \times\left(\frac{s}{b}\right)^2-13.08\left(\frac{s}{b}\right)^3+14.00 \times\left(\frac{s}{b}\right)^4. \quad (21)$$

对 $K_{f II}$,有:

$$K_{f II}=1.1215 \frac{Q}{b} \sqrt{\pi s} . \quad (22)$$

式中: Q 为渠坡板距弧底板 $\frac{1}{3}l$ 处初始裂缝部位的剪力。

对 K_{fI} 和 K_{fII} 进行进一步推算,其结果为:

$$K_{fI} = \frac{6M}{b^2} \sqrt{\pi s} F\left(\frac{s}{b}\right) = 6 \cdot \left[\frac{5}{144} \tau_{\max} \left(\frac{l}{b}\right) - \frac{31}{648} q_{\max} \left(\frac{l}{b}\right)^2 \right] \sqrt{\pi s} F\left(\frac{s}{b}\right), \quad (23)$$
$$K_{fII} = 1.1215 \frac{Q}{b} \sqrt{\pi s} = 1.1215 \times \left[\frac{1}{72} q_{\max} \left(\frac{l}{b}\right) + \frac{5}{16} \tau_{\max} \right] \sqrt{\pi s}. \quad (24)$$

经试验结果分析得 K_{fIc} (MPa·m^{1/2}) 是与含水量、温度、加载速率有关的量,在含水量不变、加载速率一定的情况下^[14], K_{fIc} 可以按下式计算:

$$\begin{cases} K_{fIc} = 0.097 + 0.052|T|, T > -10\text{ }^{\circ}\text{C}。 \\ K_{fIc} \text{ 参考文献[14]选取}, T \leq -10\text{ }^{\circ}\text{C}。 \end{cases} \quad (25)$$

选取 $\frac{b}{l} = \frac{1}{8}$, 根据式(19)强度准则的极限条件得:

$$F\left(\frac{s}{b}\right) = \frac{K_{fIc} - 1.1215 \left(\frac{1}{9} q_{\max} + \frac{5}{16} \tau_{\max} \right) \sqrt{\pi s}}{6 \left(\frac{248}{81} q_{\max} - \frac{5}{8} \tau_{\max} \right) \sqrt{\pi s}}. \quad (26)$$

通过(21)式和(26)式相等,利用迭代法便可求出渠道坡板的厚度 b 。

3.2 弧底板的断裂力学模型

渠底板断裂力学模型与坡板相似,只是其裂缝出现的位置不同,对于弧底板而言,其裂缝一般出现

在弧底板中心处。同渠坡板相似,底板也为 I-II 复合型断裂力学问题,选取的断裂准则为式(1),其中:

$$K_{fI} = \frac{6M_0 \sqrt{\pi s} F\left(\frac{s}{b}\right)}{b^2} = 6 \cdot \left[\left(\frac{7q_{\max} \cdot l}{24} + \frac{5\tau_{\max} b}{16} \right) r \sin \alpha + \tau_{\max} l r \sin^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right) + \frac{\tau_{\max} r^2 \left(\frac{\alpha^2}{2} + \cos \alpha - 1 \right)}{\alpha} - 2q_{\max} r \sin^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right] \frac{\sqrt{\pi s} F\left(\frac{s}{b}\right)}{b^2}. \quad (27)$$
$$K_{fII} = \frac{1.1215 Q_0 \sqrt{\pi s}}{b} = 1.1215 \left[\frac{\tau_{\max} \cdot r (\alpha - \sin \alpha)}{\alpha} + \left(\frac{7q_{\max} \cdot l}{24} + \frac{5\tau_{\max} b}{16} \right) \cdot \cos \alpha + \frac{\tau_{\max} \cdot l \sin \alpha}{2} - q_{\max} r \cdot \sin \alpha \right] \frac{\sqrt{\pi s}}{b}. \quad (28)$$

然后根据等式(19),利用迭代法就可求出渠底板的厚度 b 。

4 应用实例

本研究选取甘肃靖会总干渠试验段混凝土衬砌的弧底梯形渠道为对象进行分析,其材料参数如表 1^[15]所示。

表 1 甘肃靖会总干渠试验段混凝土衬砌渠道资料概况
Table 1 Information of concrete lining channel of main canal test section in Jinghui, Gansu

渠床土质 Canal bed soil	渠道部位 Channel parts	冻深/cm Frozen depth	月平均温度/℃ Monthly temperature		
			12 月 December	1 月 January	2 月 February
粉质黏土 Silty clay	阴坡 Shady slope	80	−4.6	−5.2	−1.6
	渠底 Channel bottom	61	−3.7	−4.7	−0.5
	阳坡 Sunny slop	47	−3.5	−4.2	−0.6

已知本试验段地下水位高于渠底 2.1 m,其临界地下水位为 1.8 m,边坡坡长 $l=1.32$ m,弧半径 $r=2.03$ m,坡脚 $\alpha=45^{\circ}$,最大切向冻结力 $\tau_{\max}$ 与土质系数 c 、 m 取值有关,可根据下面经验公式计算^[16]:

$$\tau_{\max} = c + mt. \quad (29)$$

式中: t 为负温的绝对值,取月平均表面温度最小值; c 、 m 为与土质有关的系数,一般取 $c=0.4$ kPa, $m=0.6$ kPa/℃。

4.1 阴坡坡板抗冻胀设计

- 1)混凝土材料的断裂韧度。根据(25)式得: $K_{fIc}=0.3674\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。
- 2)确定最大法向冻胀力 $q_{\max}$ 和最大切向冻结力

$\tau_{\max}$ 。根据文献[6]中最大法向冻胀力计算公式,可得法向冻胀力的最大值 $q_{\max}=7.83$ kPa; $\tau_{\max}$ 根据公式(29)计算,可得 $\tau_{\max}=3.52$ kPa。

3)混凝土板初始裂缝尺寸 $s=1.5$ mm,根据公式(26)得:

$$F\left(\frac{s}{b}\right)_{\text{阴}} = 1.105。$$

由(21)式得:

$$F\left(\frac{s}{b}\right)_{\text{阴}} = 1.122 - 1.4 \times \left(\frac{s}{b}\right)_{\text{阴}} + 7.33 \times \left(\frac{s}{b}\right)_{\text{阴}}^2 - 13.08 \times \left(\frac{s}{b}\right)_{\text{阴}}^3 + 14.00 \times \left(\frac{s}{b}\right)_{\text{阴}}^4 = 1.105。$$

通过迭代得 $b_{\text{阴}}=12$ cm。

4.2 阳坡坡板的抗冻胀设计

1) 混凝土材料的断裂韧度。根据(25)式得:
 $K_{fIc} = 0.341\ 4\ \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

2) 阳坡的最大切向冻结力 $\tau_{\max} = 2.92\ \text{kPa}$,
 $q_{\max} = 7.83\ \text{kPa}$, 同理可得 $F\left(\frac{s}{b}\right)_{\text{阳}} = 1.096$, 从而得
 $b_{\text{阳}} = 8\ \text{cm}$ 。

4.3 弧底板的抗冻胀设计

1) 渠底板的断裂韧度为: $K_{fIc} = 0.315\ 4\ \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $s = 1.5\ \text{mm}$ 。切向冻结力按公式计算, 得 $\tau_{\max} = 3.22\ \text{kPa}$; 法向冻胀力与渠坡相同, 即
 $q_{\max} = 7.83\ \text{kPa}$ 。

2) I 型断裂韧度, 有:

$$K_{fI} = \left(\frac{5.4}{b^2} + \frac{7.2}{b} \right) \sqrt{\pi s} F\left(\frac{s}{b}\right)_{\text{渠底}}。$$

II 型断裂韧度, 有:

$$K_{fII} = \left(1.35 - \frac{5.61}{b} \right) \sqrt{\pi s}。$$

根据(19)式, 得:

$$\left(\frac{5.4}{b^2} + \frac{7.2}{b} \right) \sqrt{\pi s} F\left(\frac{s}{b}\right)_{\text{渠底}} + \left(0.65 - \frac{8.3}{b} \right) \sqrt{\pi s} = 315.4。$$

上式为 b 的四次函数, 采用迭代法即可求出
 $b_{\text{渠底}} = 10\ \text{cm}$ 。

5 结 论

1) 通过对混凝土衬砌板的合理简化, 在已有的冻胀破坏力学研究的基础上, 考虑了材料本身的缺陷即初始裂纹, 运用线弹性断裂力学知识和理论, 引入断裂力学准则, 建立了新的高地下水位弧底梯形渠道冻胀断裂力学模型。

2) 在本研究建立的高地下水位弧底梯形衬砌渠道渠坡板冻胀力学模型中, 将法向冻结力简化为集中力, 渠坡板最易出现断裂的部位是在距离渠坡板底部 $\frac{1}{3}$ 处, 弧底板最易出现断裂的部位在弧底板中心处, 由于混凝土衬砌渠道的断裂是在一系列力的相互作用下发生的变形、弯曲等破坏, 所以其裂缝必然是在弯矩剪力共同作用下产生的, 符合线弹性断裂力学的 I-II 复合型裂纹特点。

3) 通过所建立的冻胀断裂力学模型和实例计算, 表明本研究所建立的冻胀断裂力学模型是正确的, 且计算过程简单、实用性强。阴坡由于温度较低, 所以冻胀力和冻深均较大, 其衬砌板厚度相应也

较大, 渠底次之, 阳坡最小, 符合工程的实际工况。

4) 相对于梯形断面的冻胀断裂力学模型, 高地下水位弧底梯形断面独特的结构受力和变形特征, 使得其较梯形断面使用更广泛, 所建立的冻胀断裂力学模型更加清楚地阐明了弧底梯形混凝土衬砌的破坏特征, 因而更具实用价值。

【参考文献】

- [1] 王正中, 陈立杰, 牟声远, 等. 聚合物涂层与沥青混凝土衬砌渠道冻胀数值模拟 [J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2009, 28(6): 961-964.
Wang Z Z, Chen L J, Mu S Y, et al. The frost heave numerical simulation of polymer coating and asphalt concrete lining channel [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2009, 28(6): 961-964. (in Chinese)
- [2] 刘旭东, 王正中, 闫长城, 等. 基于数值模拟的“适变断面”衬砌渠道抗冻胀机理探讨 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 6-11.
Liu X D, Wang Z Z, Yan C C, et al. Exploration on anti-frost heave mechanism of self-adjusting lining cannal based on computer simulation [J]. Transaction of the CSAE, 2010, 26(12): 6-11. (in Chinese)
- [3] 陈立杰, 王正中, 刘旭东, 等. 高地下水位灌排渠道衬砌结构抗冻胀数值模拟 [J]. 长江科学院院报, 2009, 26(9): 66-70.
Chen L J, Wang Z Z, Liu X D, et al. The anti-frost heave numerical simulation of high groundwater irrigation channel lining structure [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(9): 66-70. (in Chinese)
- [4] 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(S1): 211-214.
Liao Y, Liu J J, Chen S F. The research of concrete channels frost heaving damage mechanism and antifreeze technology [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(S1): 211-214. (in Chinese)
- [5] 辛英华, 王正中. U 形衬砌渠道结构及水力最佳断面的分析 [J]. 节水灌溉, 2008(2): 36-38, 45.
Xin Y H, Wang Z Z. The analysis of U-shaped lining channel structure and the hydraulic optimum section [J]. Water Saving Irrigation, 2008(2): 36-38, 45. (in Chinese)
- [6] 王正中, 李甲林, 陈涛. 弧底梯形渠道砼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 Z Z, Li J L, Chen T. The research of frost heaving damage mechanics model for arc bottom trapezoidal channel concrete lining [J]. Transaction of the CSAE, 2008, 24(1): 18-23. (in Chinese)
- [7] 孙杲辰, 王正中, 王文杰, 等. 梯形渠道砼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 G C, Wang Z Z, Wang W J, et al. The frost heaving damage fracture mechanics model with trapezoidal channel concrete lining and its application [J]. Transaction of the CSAE, 2013, 29(8): 108-114. (in Chinese)
- [8] 李洪升, 刘晓洲, 刘增利. 冻土断裂力学破坏准则及其在工程中

- 的应用[J]. 土木工程学报, 2006, 39(1): 65-69, 78.
- Li H S, Liu X Z, Liu Z L. Permafrost fracture failure criterion and its application in engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(1): 65-69, 78. (in Chinese)
- [9] 刘增利, 李洪升, 朱元林, 等. 冻土 I-II 型复合断裂准则的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 13-17.
- Liu Z L, Li H S, Zhu Y L, et al. The test research of permafrost I-II compound fracture criterion [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(2): 13-17. (in Chinese)
- [10] 孙杲辰, 王正中, 娄宗科, 等. 高地下水位弧底梯形渠道混凝土衬砌冻胀破坏力学模型探讨 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(12): 201-206, 213.
- Sun G C, Wang Z Z, Lou Z K, et al. The high underground water level arc bottom trapezoidal channel concrete lining of frost heaving damage mechanics model to explore [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2012, 40(12): 201-206, 213. (in Chinese)
- [11] 肖 旻, 李寿宁, 贺兴宏. 梯形渠道砼衬砌冻胀破坏力学分析 [J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(1): 89-93.
- Xiao M, Li S N, He X H. Trapezoidal channel concrete lining of frost heaving damage mechanics analysis [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(1): 89-93. (in Chinese)
- [12] 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.
- Li X D, Wang Z Z, Yan C C, et al. Based on the numerical simulation of the double layer film anti-seepage lining channels antifreeze expansion mechanism discussion [J]. Transaction of the CSAE, 2011, 27(1): 29-35. (in Chinese)
- [13] 李 超. 弧底梯形混凝土衬砌渠道冻胀力学模型和数值模拟 [D]. 新疆石河子: 石河子大学, 2010: 1-71.
- Li C. The frost heave mechanics model and the numerical simulation of arc bottom trapezoidal concrete channel lining [D]. Shihezi, Xinjiang: Shihezi University, 2010: 1-71. (in Chinese)
- [14] 李洪升, 朱元林. 冻土断裂力学及其应用 [M]. 北京: 海洋出版社, 2002: 1-151.
- Li H S, Zhu Y L. Permafrost fracture mechanics and its application [M]. Beijing: Ocean Press, 2002: 1-151. (in Chinese)
- [15] 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 test of channel frost heave simulation and the lining structure stress analysis [J]. Technique of Seepage Control, 2000, 6(1): 5-16. (in Chinese)
- [16] 王正中. 梯形渠道砼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. The frost heaving damage mechanics model of the study of trapezoidal channel concrete lining [J]. Transaction of the CSAE, 2004, 20(3): 24-29. (in Chinese)