

弧脚梯形衬砌渠道抗冻胀及水力合理断面的分析

芦 琴^{1a,3}, 王正中^{1a,2}, 刘计良^{1b}, 刘旭东^{1a}

(1 西北农林科技大学 a 水工程安全与病害防治研究中心, b 理学院, 陕西 杨凌 712100;

2 中国科学院 国家冻土工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3 杨凌职业技术学院, 陕西 杨凌 712100)

[摘 要] **【目的】**推导出适宜于季节性冻土区弧脚梯形衬砌渠道的断面形式。**【方法】**根据冻土力学、水力学、工程力学理论,分析弧脚梯形渠道衬砌冻胀破坏机理及破坏特征,指出对季节性冻土区弧脚梯形渠道最优断面的设计,要从结构抗冻胀和水力学两方面考虑,以衬砌体同时满足水力最佳及抗冻胀性能最优为原则,对弧脚梯形渠道断面的最优形式进行推导。**【结果】**根据工程实践中常用的取值范围,在综合考虑水力最佳断面及衬砌板抗冻胀性能最优的基础上,得到最优断面的几何参数,即水力最佳和抗冻胀性能最优的弧脚梯形最优断面为:渠底宽是设计水深的0.53倍,坡脚圆弧半径是设计水深的0.3倍,坡脚圆弧中心角即边坡板的倾角为 51° 。**【结论】**此断面形式不但能适应季节性冻土区渠道防渗抗冻胀工程的实践要求,而且便于机械化施工。

[关键词] 弧脚梯形断面;衬砌渠道;冻胀破坏;水力最佳断面;受力分析

[中图分类号] S274

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2010)01-0231-04

Analysis of anti-frost heaving and reasonable hydraulic section of the channel in trapezoidal section with curved slop toe

LU Qin^{1a,3}, WANG Zheng-zhong^{1a,2}, LIU Ji-liang^{1b}, LIU Xu-dong^{1a}

(1 a Research Center of Engineering Safety and Disease Prevention, b College of Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAS, Lanzhou, Gansu 730000, China;

3 Yangling Vocational & Technical College, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】**The research was conducted to find out the section form of the trapezoidal section with curved slop toe of the concrete lining channel, which is suitable in the seasonally frozen area. **【Method】**Based on the theory of soil mechanics, hydraulics, engineering mechanics, we analyzed the frost heaving destruction and destructive character of concrete lining channel in trapezoidal section with curved slop toe, pointed out that structure anti-frost heaving and hydraulics must be considered, because when designing the best trapezoidal section with curved slop toe in seasonally frozen area, it is the rule that the concrete lining structure must be the best hydraulic structure and have the best capability of anti-frost heaving. At the same time, this paper deduced the best form of the trapezoidal section with curved slop toe. **【Result】**based on the common used area of the numeric value, the geometrical parameter of the reasonable cross section is obtained. **【Conclusion】**This section is more suitable for the anti-frost demand and convenient for mechanic construction.

Key words: trapezoidal section with curved slop toe; concrete lining channel; frost heaving destruction; the best hydraulic section; stress analysis

* [收稿日期] 2009-04-17

[基金项目] 国家“863”高新技术研究与发展计划项目(2002AA62Z3191); 国家冻土工程重点实验室基金项目(9901)

[作者简介] 芦 琴(1979—), 女, 新疆石河子人, 在读博士, 主要从事冻土本构研究。E-mail: lqyjk0993@126.com

[通信作者] 王正中(1963—), 男, 陕西彬县人, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构及冻土本构研究。
E-mail: wangzz0910@yahoo.com.cn

渠道防渗衬砌是减少输水损失、提高输水效率、保护岸坡稳定、有效控制地下水位的普遍工程措施,在发展节水灌溉中占有十分重要的地位。弧脚梯形断面是近年来发展起来的防断面形式,由于该断面形式水力条件好、渠道占地少、抗冻胀性能好而广泛应用于北方季节性冻土地区。通常所说的渠道水力最佳断面是指在流量一定时,过水面积最小、湿周最短的断面形式,这样既能节省衬砌用料和用工,又能减少沿程水头损失。以往对弧脚梯形衬砌渠道最佳断面的设计,仅从水力学单方面考虑^[1],这对非冻土地区是可行的,结构一般不会破坏;但对于北方季节性冻土地区,在渠道衬砌设计中,若不考虑冻胀破坏,仅凭经验设计难以保证渠道的安全越冬运行。为此,本研究从水力最佳、抗冻胀性能最优 2 个方面进行研究,以期探索弧脚梯形断面的最优形式。

1 基本原理

1.1 衬砌破坏原因

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,使衬砌板成为压弯构件,渠坡成为偏心压弯构件,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阴坡坡板的切向冻结力同时达到极限状态时,衬砌板的拉应力达到最大,而渠道衬砌体一般自重很轻,不足以抵抗基土的冻胀力。对于有约束力的衬砌体,产生局部开裂;对于无约束力的衬砌体,在冻胀力作用下整体上抬,当产生不能允许的变形时,长期积累,无法复位,反复冻融,产生滑塌现象,衬砌结构就发生冻胀破坏。

1.2 基本假设及简化

总结前人研究成果引用如下假设^[2-8]:

(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,结构变形仍为小变形,可应用迭加原理。

(2)渠床土冻结前已固结完成,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(一般为 1/10 左右),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,或在低温下毛管水正好能补给到渠顶处。

(5)单独就渠坡段、坡脚及渠底段而言,近似为

单向冻结。

(6)坡板衬砌上的法向冻胀力沿渠坡线性分布,坡板和坡脚相接处最大,坡脚板和渠底板上的法向冻胀力均匀分布。

(7)渠坡衬砌板上的切向冻结力沿坡长线性分布,在坡板和坡脚相接处达到最大值,在弧脚上也为线性分布,在坡脚和底板相交处为零,底板则忽略切向冻结力。

(8)通过衬砌结构整体上抬及微小侧移的变位协调,将各向冻胀力及冻结力重新调整,近似认为外力及内力接近对称分布。

(9)弧脚梯形渠道的衬砌结构近似简化为,在法向对称分布冻胀力和重力作用及在切向冻结力约束下,保持静力平衡的近似薄壳拱形结构。

2 弧脚梯形渠道水力最佳断面的计算

从设计角度考虑,总是希望所选定的横断面形状在通过已知的设计流量时面积最小,或者过水面积一定时通过的流量最大。符合这种条件的断面,称之为水力最佳断面,其渠道流量公式为:

$$Q = \frac{\sqrt{i} A^{\frac{5}{3}}}{n \chi^{\frac{2}{3}}} \quad (1)$$

式中: $Q(\text{m}^3/\text{s})$ 为流量, i 为渠道底坡, n 为粗糙系数, $A(\text{m}^2)$ 为过水断面面积, $\chi(\text{m})$ 为湿周。

弧脚梯形渠道水力最佳断面是指在底坡 i 、粗糙系数 n 及流量 Q 一定时,湿周 χ 愈小,所需的过水断面面积 A 也愈小。弧脚梯形渠道断面结构如图 1 所示。

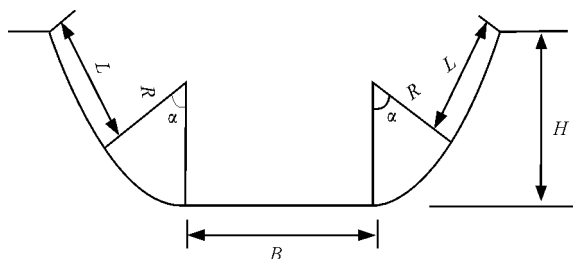


图 1 弧脚梯形渠道断面尺寸

Fig. 1 Section size of trapezoidal canal with arc-foot

由图 1 可推得下面的几何关系式:

$$\frac{L + KH \sqrt{2(m_1^2 - m_1 m) - 1}}{m_1} = H \quad (2)$$

式中: $L(\text{m})$ 为坡板长; $H(\text{m})$ 为水深; m 为边坡系数; α 为坡脚圆弧中心角; $R(\text{m})$ 为坡脚圆弧半径; K 和 m_1 是为了简化推导所假定的参数, $m_1 = \sqrt{1 + m^2}$, $m = \text{ctg} \alpha$, $K = \frac{R}{H}$ 。可得弧脚梯形渠道的过

水断面面积和湿周分别为:

$$A = [(\alpha + 2m - 2m_1)K^2 + 2(m_1 - m)K + m]H^2 + BH; \quad (3)$$

$$\chi = [2(\alpha + m - m_1)K + 2m_1]H + B. \quad (4)$$

文献[9]曾将 R 作为一个独立的变量进行寻优,在求水力最佳断面时,导致弧脚梯形渠道演化为弧底梯形渠道,无法得到最优结果。故将 $K = \frac{R}{H}$ 取为固定的值进一步寻优,将渠道底宽 B 作为变量,根据水力最佳断面的定义,参照文献[9],求下面的方程组:

$$\begin{cases} \frac{dA}{dB} = 0; \\ \frac{d\chi}{dB} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

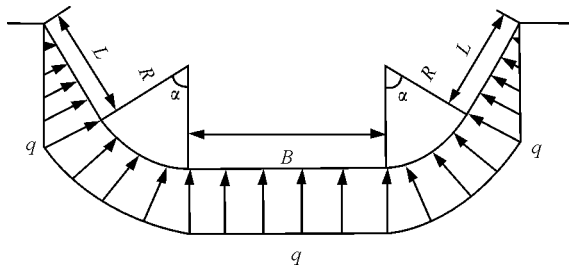


图 2 弧脚梯形渠道砼衬砌结构法向冻胀力的分布

Fig. 2 Distribution of normal frost-heaving force of concrete lining trapezoidal canal with arc-angle

边坡板段的弯矩为:

$$M(x) = \frac{q}{6L}x^3 - \frac{b\tau}{4L}x^2 - \frac{\gamma b \cos \alpha}{2}x^2, \quad (7)$$

$$0 \leq x \leq L$$

$$M_{\max} = \frac{q}{6}L^2 - \frac{b\tau}{4}L - \frac{\gamma b \cos \alpha}{2}L^2. \quad (8)$$

弧脚段的弯矩为:

$$M_{\max} = \frac{q}{2}R^2 \sin^2 \alpha + \frac{QR \sin 2\alpha}{2} + M + 2NR \sin^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right) - \frac{\gamma b R^2 \alpha \sin \alpha}{2}. \quad (9)$$

其中:

$$N = \frac{\tau + \gamma b \sin \alpha}{2}L,$$

$$M = \frac{q}{6}L^2 - \frac{b\tau}{4}L - \frac{\gamma b \cos \alpha}{2}L^2,$$

$$Q = \frac{q}{2}L - \gamma b \cos \alpha L.$$

渠底板处的最大弯矩为:

$$M_{\max} = \frac{1}{8}(q - \gamma b)B^2. \quad (10)$$

由于弧脚梯形渠道的冻裂缝一般出现在坡脚与边坡板及底板的交接处,而这两处分别为正弯矩最

从而得到水力最佳断面的统一公式为:

$$\frac{B}{H} = 2[(m_1 - m) + (\alpha + 3m - 3m_1)K + (2m_1 - 2m - \alpha)K^2]. \quad (6)$$

3 弧脚梯形渠道衬砌冻胀受力分析

参考文献[4,6]并结合 1.2 中的假设,可知弧脚梯形断面渠道砼衬砌结构上的法向冻胀力分布如图 2 所示,其最大法向冻胀力为 q 。

弧脚梯形断面渠道砼衬砌结构上的切向冻胀力分布如图 3 所示,其最大切向冻胀力为 τ 。

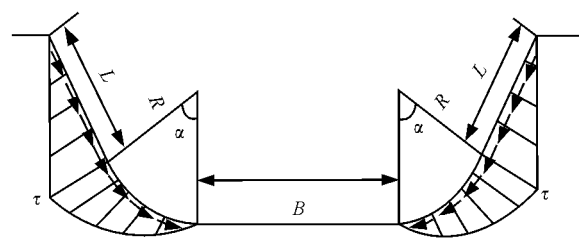


图 3 弧脚梯形渠道砼衬砌结构切向冻胀力的分布

Fig. 3 Distribution of tangential freezing reverse force of concrete lining trapezoidal canal with arc-angle

大处和负弯矩最大处,具体如图 4 所示。

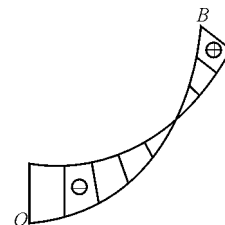


图 4 坡脚与边坡板及底板交接处正负最大弯矩的分布

Fig. 4 Distribution of the positive and minus maximum bending moment of the connect point of arc-foot, slope and motherboard

要使在相同衬砌厚度下,衬砌受力均匀,可以使衬砌板上两最大弯矩绝对值相等^[2],即:

$$\begin{aligned} \frac{q}{6}L^2 - \frac{b\tau}{4}L - \frac{\gamma b \cos \alpha}{2}L^2 &= \frac{q}{2}R^2 \sin^2 \alpha + \\ \frac{QR \sin 2\alpha}{2} + M + 2NR \sin^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right) - \frac{\gamma b R^2 \alpha \sin \alpha}{2}. \end{aligned} \quad (11)$$

由衬砌体整体竖直方向的平衡条件得:

$$\begin{aligned} qL \cos \alpha + 2qR \sin \alpha + qB &= \\ \tau L \sin \alpha + 2b\gamma \left(L + R + \frac{B}{2} \right). \end{aligned} \quad (12)$$

即可得到如下关系:

$$q = \frac{\tau}{m+n+\frac{B}{L\sin\alpha}} + \frac{(2+n\alpha+\frac{B}{L})b\gamma}{(m+n)\sin\alpha+\frac{B}{L}} \quad (13)$$

4 弧脚梯形渠道抗冻胀及水力最佳断面的求解

以上各式中的 L 由(2)式确定,并且有 $R = KH$,将(13)式代入(11)式,即可联立(6)式求解(过程比较烦琐,在此略去)。在实践中, $\alpha \in (\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2})$, $K \in (0, 1)$,求得近似解为: $\frac{B}{H} = 0.53$, $\alpha = 51^\circ$, 对应的 $m = 1.1$, $K = \frac{R}{H} = 0.3$ 。该解的工程意义,即水力最佳和抗冻胀性能最优的弧脚梯形最优断面为:渠底宽是设计水深的 0.53 倍,坡脚圆弧半径是设计水深的 0.3 倍,坡脚圆弧中心角即边坡板的倾角为 51° 。据此便可对弧脚梯形渠道进行设计。在工程实践中,断面的参数是根据经验选取的,而本研究的断面参数是在综合考虑了水力最佳断面及砼衬砌板抗冻胀性能的基础上得到的较优断面参数。

5 结 论

本研究从抗冻胀性能最优和水力最佳 2 个方面,建立了最优弧脚梯形断面的计算方法,该断面既是水力最佳断面,而且又受力均匀,抗冻胀性好,更能发挥弧脚梯形渠道的优点。

[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 [S]. 北京: 水利水电出版社, 2004.
The Ministry Water Resources of the People's Republic of China. Technique specification for seepage prevention engineering on canal [S]. Beijing: China Waterpower Press, 2004. (in Chinese)
- [2] 辛英华, 王正中. U 型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.
- Xin Y H, Wang Z Z. The structural and hydraulic analysis on frost-heaving concrete lining of the U-shape canal [J]. Water Saving Irrigation, 2008(2): 36-38. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] 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. Establishment and application of mechanics models of frost heaving damage of concrete lining trapezoidal open canal [J]. Transaction of the CSAE, 2004, 20(3): 24-29. (in Chinese)
- [5] 王正中, 万 斌, 姬红云, 等. 混凝土渠道衬砌底板裂缝的计算与探讨 [J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(3): 78-81.
Wang Z Z, Wan B, Ji H Y, et al. Discussion and calculation of the crevices in concrete underlying board of water channel [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 21(3): 78-81. (in Chinese)
- [6] 王正中, 李甲林, 陈 涛, 等. 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, et al. Mechanics models of frost-heaving damage of concretelining trapezoidal canal with arc-bottom [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(1): 18-23. (in Chinese)
- [7] 余书超, 宋 玲. 刚性衬砌渠道受冻胀时衬砌层受力的试验研究 [J]. 中国农村水利水电, 2001(9): 4-5.
Yu S C, Song L. Experimental research on stressing status of rigidlining of canals under frost upheaval [J]. China Rural Water and Hydropower, 2001(9): 4-5. (in Chinese)
- [8] 建 功. 我国渠道防渗工程的冻害及其防治措施 [J]. 防渗技术, 2002(2): 1-4.
Jian G. The frost heave destruct and the prevention and cure methods for the channel anti-seepage engineering [J]. Technique of Seepage Control, 2002(2): 1-4. (in Chinese)
- [9] 荣丰涛. 梯形类渠道水力最佳断面统一公式的推求 [J]. 山西水利科技, 2003(4): 5-7.
Rong F T. Derivation of unified equation for best hydraulic section of trapezoid-typed channel [J]. Shanxi Hydrotechnics, 2003(4): 5-7. (in Chinese)