

梯形衬砌渠道边坡(m)的优选方法

陈 平¹,程吉林¹,钱爱云²,欧建锋¹

(1. 扬州大学水利学院,江苏 扬州 225009 ;2. 常州职工大学,江苏 常州 213000)

摘要 :在梯形渠道水力最佳断面计算及梯形衬砌渠道侧墙稳定性计算的基础上,根据侧墙厚度变化和渠道占地变化所引起费用变化的经济分析,提出了梯形衬砌渠道主要由满足侧墙强度要求的最小板厚决定边坡(m)的方法,改变了过去渠道设计中仅凭经验或单纯以水力断面最优选取边坡的局限性.据此优选的边坡(m)既兼顾了水力断面最优又具有侧墙的稳定性的,从而使衬砌量最小.

关键词 梯形衬砌渠道 边坡 水力最优断面 侧墙稳定

中图分类号 :S277 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2000)05-0025-05

目前,节水灌溉正在我国各地大面积推广,渠道防渗是节水灌溉的重要措施之一.在渠道防渗工程措施中,梯形混凝土衬砌渠道因其结构简单、施工方便而得到了较为广泛的应用,为节水灌溉的发展起到了积极的推动作用.但在已实施的许多梯形衬砌渠道中,排除施工质量差、材料不合格等因素外,由于缺乏科学的设计,以致出现侧墙稳定性不够使渠道不能正常发挥效益甚至坍塌,或侧墙稳定安全系数过大,造成材料浪费、投资偏大而影响推广应用的现象.如何使梯形衬砌渠道既能发挥稳定可靠、防渗效果好、寿命长等优点,又能保证渠道节省占地、经济合理,就显得较为迫切.

渠道优化设计方法自 80 年代起有了较大发展,主要包括横断面优化方法^[1~5]和纵横断面优化方法^[6,7].这些优化方法中,对梯形渠道而言,均是将边坡 m 作为已知参数考虑,还未见对边坡 m 的优选方法研究.虽然,Paviz^[4]在其提出的用拉格朗日乘子法对渠道水力最优横断面优化计算中,将梯形断面的底宽 b 、水深 h 、边坡 m 作为三个独立变量,得出 $m = \sqrt{3}/3$ 时梯形水力断面最优、湿周最小(即衬砌量最小),但没有考虑不同土壤和水深(流量)对侧墙稳定性的影响.若都以此边坡实施工程,势必影响侧墙稳定;或要在此边坡下保持侧墙稳定必须通过加大侧墙厚度来保证,这无形中增加了衬砌量,所以它只是一个理论上的最优边坡而已.目前,在渠道设计中,边坡 m 往往根据土质、流量等参数结合实际经验选取,主观任意性大.对衬砌渠道而言,边坡 m 的大小直接影响到侧墙稳定性、渠道的口宽(占地)、过流能力及衬砌量.为此,本文在渠道最佳水力断面计算及侧墙稳定性计算的基础上,通过对侧墙厚度变化和占地变化所引起费用变化的经济分析,提出了梯形衬砌渠道边坡 m 的优选方法.

1 梯形最佳水力断面计算

Paviz 于 1994 年提出了用拉格朗日乘子法确定各种断面形式水力最佳断面的方法.设横断面可由 m 个独立参数($x_1, x_2, \dots, x_m$)来描述,如过水断面面积 $A = A(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 和湿周 $W = W(x_1, x_2, \dots, x_m)$,流量公式采用均匀流公式

$$Q = AC \sqrt{RI}$$
$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}$$
$$R = A/W$$

(1)

则

$$Q = A^{5/3} W^{-2/3} \frac{\sqrt{I}}{n}$$

(2)

式中： C ——谢才系数； R ——水力半径； n ——糙率； I ——渠道底坡。

以湿周或过水断面面积最小为目标函数，采用拉格朗日乘子法求得最佳水力断面的数学模型为

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial x_1} \frac{\partial W}{\partial x_2} = \frac{\partial A}{\partial x_2} \frac{\partial W}{\partial x_1}, \frac{\partial A}{\partial x_1} \frac{\partial W}{\partial x_3} = \frac{\partial A}{\partial x_3} \frac{\partial W}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial A}{\partial x_1} \frac{\partial W}{\partial x_m} = \frac{\partial A}{\partial x_m} \frac{\partial W}{\partial x_1} \\ Q = A^{5/3} W^{-2/3} \frac{\sqrt{I}}{n} \end{cases} \quad (3)$$

若假定梯形断面可用边坡 $x_1 = m$ 、水深 $x_2 = h$ 、底宽 $x_3 = b$ 三个独立变量来描述，则有 $A = bh + mh^2$ ， $W = b + 2h\sqrt{1+m^2}$ 。将其代入式(3)，可解得 $m = \sqrt{3}/3$ 。参数 h, b, W 等仅是 Q, I, n 的函数，可表示为不同常数与 $\left(\frac{nQ}{\sqrt{I}}\right)^{3/8}$ 的乘积。

这说明水力最佳梯形断面的边坡 $m = \sqrt{3}/3$ 。前已指出，这仅是理论最优值，没有考虑不同土壤、流量及衬砌板厚对侧墙稳定性的影响，因而实际上是不适用的；况且，这一结论是在假定三参数独立的条件下求得的，事实上这三参数是不独立的。

若将以上三参数作为非独立变量，则代入式(3)中可求得

$$\begin{cases} h = \frac{2^{1/4}}{(2\sqrt{1+m^2} - m)^{3/8}} \left(\frac{nQ}{\sqrt{I}}\right)^{3/8} & b = 2\sqrt{1+m^2} - m)h \\ B = 2\sqrt{1+m^2}(h + \Delta h) & W = 2^{5/4}(2\sqrt{1+m^2} - m)^{5/8} \left(\frac{nQ}{\sqrt{I}}\right)^{3/8} \end{cases} \quad (4)$$

式中： B ——渠道口宽； Δh ——渠道堤顶超高。

由此可见，梯形最佳水力断面在 $Q, I, n, \Delta h$ 一定时， h, b, B 和 W 仅是边坡 m 的函数。

2 梯形衬砌渠道侧墙稳定性计算

梯形衬砌渠道一般由底板和倾斜的侧墙组成(上部封顶板短小，计算中不计)。侧墙可看成以墙底简支的悬臂板，其受到的荷载主要有土压力、自重及墙底支承力，在寒冷地区还应考虑土壤的冻胀反力。墙后土壤常因雨水的渗入而使侧墙受力加大，发生内倾位移，导致失稳破坏。为安全起见，考虑渠内无水，墙后土壤含水量饱和。视侧墙为俯斜式挡土墙，侧墙荷载简图见图1。

沿渠道水流方向取单位长度，总的主动土压力按库伦理论计算^[8]，计算公式如下：

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma_s H^2 K_a \quad (5)$$

$$K_a = \frac{\cos^2(\varphi - \alpha)}{\cos^2 \alpha \cos(\alpha + \varphi_0) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \varphi_0) \sin(\varphi - \beta)}{\cos(\alpha + \varphi_0) \cos(\alpha - \beta)}} \right]^2} \quad (6)$$

式中： K_a ——库伦理论的主动土压力系数； α ——墙背面与竖直线的夹角，俯斜的墙背 α 为负； β ——填土表面与水平面夹角，渠道一般墙后土平墙顶且水平，所以 $\beta = 0$ ； φ_0 ——墙背面与填土间的摩擦角，俯斜的混凝土墙背 $\varphi_0 = \frac{1}{3} \varphi$ ； φ ——墙后土的内摩擦角(与土质有关)； H ——渠深，为渠道设计水位 h 加上超高 Δh ，其中 h 由式(4)确定； γ_s ——墙后土壤饱和容重。

若侧墙边坡为 m ，则 $\theta = \text{arccot } m$ ，且 $\alpha = \frac{\pi}{2} - \text{arccot } m$ ；因俯斜为负值，则 $\alpha = \text{arccot } m - \frac{\pi}{2}$ 。代入式(6)可知，当土质一定时， K_a 仅是边坡 m 的函数。

渠道侧墙单位长度自重

$$G = \gamma_c T \sqrt{1+m^2} H$$

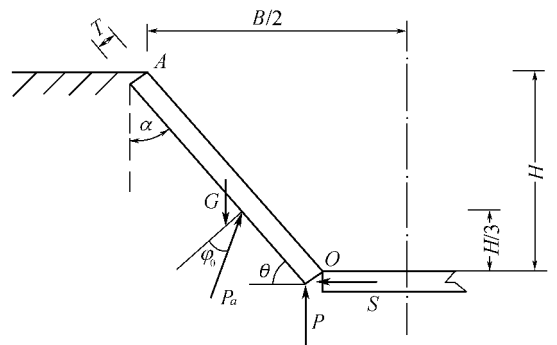


图1 梯形衬砌渠道侧墙荷载计算简图
Fig.1 Load diagram of the canal sidewall

式中 : γ_c ——混凝土容重 ; T ——侧墙厚度 ; m ——侧墙边坡(1 : m).

侧墙的破坏形式是失稳破坏 , 即板 AO 以 O 点为支点向渠内内倾位移破坏 . 其倾倾力矩 M_o 与抗倾力矩 M_r 分别为

$$M_o = \frac{1}{6} \gamma_s K_a H^3 \cos \varphi_0 / \cos \alpha \tag{7}$$

$$M_r = \frac{1}{2} m \sqrt{1 + m^2} \gamma_c T H^2 \tag{8}$$

为保证抗倾稳定 , 取抗倾安全系数 $K = 1.1$, 则要求 $M_r / M_o \geq 1.1$, 由此可得侧墙稳定所需最小厚度为

$$T \geq \frac{1.1 K_a \gamma_s (h + \Delta h) \cos \varphi_0}{3 m \sqrt{1 + m^2} \gamma_c \cos \alpha} \tag{9}$$

由式(9)可知 , 侧墙厚度 T 与土质、边坡、渠深有关 . 在土质一定的情况下 , 式(9)中 K_a 仅是 m 的函数 , 水深 h 由最佳水力断面确定(如式(4)) , 也是 m 的函数 , 故侧墙厚度 T 也仅是边坡 m 的函数 . T 与边坡 m 成反比例关系 , 即为了侧墙稳定需要 , m 越大所需侧墙厚度 T 越小 ; 反之 , m 越小所需侧墙厚度 T 越大 . 为节省衬砌量 , 实际应用中上式取等号计算 . 若给定 m , 则可求得侧墙稳定所需最小厚度 ; 反之 , 亦能求得最大 m 值 .

3 梯形衬砌渠道边坡 m 的确定

3.1 梯形衬砌渠道边坡 m 的优选模型

对衬砌渠道而言 , 最优的边坡 m 是使渠道单位长度衬砌费用与占地费用之和 F 最小 . 渠道单位长度占地费用可用渠道占地在其使用寿命内减少的作物总收益来表示 , 通过动态经济分析求得 . 故梯形衬砌渠道边坡 m 优选的目标函数为

$$\min F = \min (C_1 V + C_2 B) \tag{10}$$

约束条件为

$$T \geq T_0$$

$$V = [b + 2 \sqrt{1 + m^2} (h + \Delta h)] \times T \tag{11}$$

$$C_2 = \frac{Y_0 P}{667} \times \frac{(1 + i)^n - 1}{i(1 + i)^n} \tag{12}$$

式中 : V ——渠道单位长度衬砌量 ; C_1 ——单位体积混凝土造价 , 简称为衬砌费用系数 ; B ——渠道口宽 , 由式(4)求得 ; C_2 ——占地费用系数 ; Y_0 ——作物多年平均亩产量 ; P ——粮食单价 ; $\frac{(1 + i)^n - 1}{i(1 + i)^n}$ ——分期等付现值因子 ; i ——资金折现率 ; n ——渠道经济寿命 , 一般取 15 ~ 30 a ; T_0 ——侧墙最小允许强度厚度 , 其取值与设计流量、土质及冻胀等因素有关 .

由于在渠道设计流量、底坡和土质一定的条件下 , m 增大 T 相应减小 , 从而使衬砌量 V 减小 , 衬砌费用也相应减小 . 渠道口宽 B 增大 , 而由此引起的占地费用增加却不是很大 . 边坡 m 对衬砌费用影响较大 . 可以看出 , 当 m 取值越大时 , T 越接近于 0 , 即不衬砌最优 . 这显然有违节水初衷 , 是不可行的 ; 况且 , 侧墙厚 T 很小时不能满足强度要求 . 为此 , 必需根据设计流量 Q 的大小设置不同的最小板厚约束 .

在给定侧墙最小强度厚度 T_0 的约束条件下 , 由以上求得的边坡 m 才是最优的和实用的 , 它既满足了最佳水力断面及侧墙稳定的要求 , 又满足了衬砌费用与占地费用之和最小的条件 .

3.2 梯形衬砌渠道边坡 m 的求解

在给定渠道设计参数流量 Q 、底坡 I 、糙率 n 及土壤参数饱和和容重 γ_s 、内摩擦角 φ 的条件下 , 由流量 Q 选定侧墙最小强度厚度 T_0 , 代入以上模型中 , 采用单变量的非线性规划方法求解 . 另外 , 由于边坡 m 通过侧墙厚度 T 对衬砌费用影响较大 , 而 m 又与衬砌费用成反比 , 所以可由侧墙最小强度厚度 T_0 直接代入式(9)求解最优的边坡 m . 其结果与非线性规划的解是一致的 . 计算过程可编程实现 , 也可采用 excel 电子表格的计算功能一次完成 .

模型中 , 侧墙最小强度厚度 T_0 主要由侧板的抗拉和抗剪强度决定 . 具体可根据板长、倾斜度等因素通过应力计算求得 , 或查用设计规范^[9]中的适宜厚度值 . 另外 , 在寒冷地区 , 考虑冻胀破坏 , 需适当增加板厚或提高混凝土标号及配合比 , 具体计算参阅文献[10]中的相关规范(SL18—91 , SL23—91) . 实际应用中 , T_0 可根据

设计流量值大小在 3 ~ 10 cm 内选用.

4 示 例

现针对砂土、壤土和粘土三种常见土壤及几个不同流量与底坡采用本法进行优选边坡 m 示例. 三种土壤参数取为: 砂土 $\gamma_s = 0.019 \text{ N/cm}^3$, $\varphi = 25^\circ$ 壤土 $\gamma_s = 0.020 \text{ N/cm}^3$, $\varphi = 27^\circ$ 粘土 $\gamma_s = 0.021 \text{ N/cm}^3$, $\varphi = 30^\circ$. 侧墙最小强度厚度取为: $Q \leq 0.1$ 时, $T_0 = 3.0 \text{ cm}$ $0.1 < Q \leq 0.5$ 时, $T_0 = 4.0 \text{ cm}$ $0.5 < Q \leq 1.0$ 时, $T_0 = 5.0 \text{ cm}$. 计算结果如表 1 所示. 该结果可供衬砌渠道设计时参照使用, 有冻胀地区需作一定修正.

表 1 梯形衬砌渠道几种情况下的优选结果
Table 1 The optimal results of lined trapezoidal canal under several conditions

土质	流量 Q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	板厚 T_0 /cm	底坡 I	边坡 m	底宽 b /m	水深 h /m	单位衬砌量 V / m^3
砂土	0.1	3.0	1/1000	0.669	0.32	0.30	0.040
			1/2000	0.702	0.36	0.34	0.045
			1/5000	0.748	0.41	0.41	0.052
	0.5	4.0	1/1000	0.735	0.55	0.55	0.089
			1/2000	0.773	0.61	0.62	0.100
			1/5000	0.825	0.70	0.74	0.117
	1.0	5.0	1/1000	0.735	0.72	0.71	0.141
			1/2000	0.775	0.79	0.81	0.159
			1/5000	0.828	0.90	0.96	0.187
壤土	0.1	3.0	1/1000	0.628	0.33	0.30	0.040
			1/2000	0.659	0.37	0.34	0.044
			1/5000	0.701	0.42	0.41	0.051
	0.5	4.0	1/1000	0.689	0.58	0.55	0.089
			1/2000	0.724	0.64	0.62	0.100
			1/5000	0.771	0.73	0.74	0.117
	1.0	5.0	1/1000	0.689	0.75	0.71	0.140
			1/2000	0.725	0.83	0.81	0.158
			1/5000	0.774	0.94	0.96	0.185
粘土	0.1	3.0	1/1000	0.566	0.35	0.30	0.040
			1/2000	0.593	0.39	0.34	0.044
			1/5000	0.631	0.45	0.41	0.051
	0.5	4.0	1/1000	0.620	0.61	0.55	0.088
			1/2000	0.651	0.68	0.63	0.099
			1/5000	0.693	0.78	0.74	0.116
	1.0	5.0	1/1000	0.621	0.79	0.71	0.139
			1/2000	0.653	0.88	0.81	0.157
			1/5000	0.695	1.00	0.96	0.184

5 结 语

- a. 该方法是建立在侧墙稳定计算及最佳水力断面计算基础上的 , 并通过经济分析论证了侧墙厚度与边坡 m 的关系 , 为边坡 m 的优选提供了最优性与合理性. 它综合考虑了土质、侧墙厚、流量和底坡等多种因素的影响 , 使选择的边坡 m 更加科学合理.
- b. 通过该方法对梯形衬砌渠道边坡 m 的优选 , 改变了过去凭经验选取边坡的主观任意性 , 既保证了断面的稳定 , 又使衬砌费用最小且占地最省 , 便于衬砌渠道的推广应用.
- c. 示例结果表明了该方法的合理性. 该结果可供实际应用时参照选用. 若渠道封顶板施工较好 , 减少墙背雨水渗入 , 则边坡 m 值可适当减小.
- d. 该方法是建立在土渠土壤密实条件下的 , 未考虑挖、填方渠道的不同地基基础.

参考文献 :

[1] 林玉清 . 渠道经济断面的设计方法 [J]. 农田水利与小水电 , 1987 (7) 21 ~ 24 .
[2] 刘承彪 . 衬砌明渠经济断面设计 [J]. 农田水利与小水电 , 1990 (4) : 24 ~ 27 .
[3] Lawrence E Flyun , Mignel . Canal design : Optimal cross section [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering , 1987 , 113 (3) 335 ~ 355 .
[4] Paviz Monadjemi . General formulation of best hydraulic channel section [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering , 1994 , 120 (1 / 2) 27 ~ 35 .
[5] 金兆森 , 钱爱云 , 程吉林 . 小型衬砌渠系的优化设计研究综述 [J]. 节水灌溉 , 1998 (3) 22 ~ 25 .
[6] 程吉林 . 大型输水渠道工程系统优化设计 [J]. 江苏农学院学报 , 1992 , 13 (4) 47 ~ 54 .
[7] 罗金耀 , 魏永曜 . 灌溉渠系优化设计方法的研究 [J]. 水利学报 , 1990 (5) 32 ~ 40 .
[8] 钱家欢 . 土力学 [M]. 南京 : 河海大学出版社 , 1990 . 137 ~ 145 .
[9] GB 50288—99 , 灌溉与排水工程设计规范 [S].
[10] 水利部农水司 . 节水灌溉技术标准选编 [S]. 北京 : 中国水利电力出版社 , 1998 .

An Optimum Seeking Method for the Side-slope (m) of Lined Trapezoidal Canal

CHEN Ping¹ , CHENG Ji-lin¹ , QIAN Ai-yun² , OU Jian-feng¹
(1. Yangzhou University , Yangzhou 225009 , China ;
2. Changzhou Workers ' University , Changzhou 213000 , China)

Abstract : Based on the calculation of the canal sidewall stability and the hydraulically best canal cross-section , a concept is put forward that the side-slope (m) of a lined trapezoidal canal is determined by the minimal thickness of the concrete slab according to cost analysis and the land taken up by the canal . This concept will change the limitation of determining side-slope only by personal experience . The optimal results not only optimize the hydraulic section of the canal but also make the canal sidewall stable . Thus , the lining volume of trapezoidal canal can be reduced to the minimum .
Key words : lined trapezoidal canal ; side-slope ; hydraulically best canal cross-section ; sidewall stability