

宽窄相间复式河道水面线分析

庞洁, 李特 (杨凌职业技术学院水利工程分院, 陕西杨凌 712100)

摘要 水面线是水力学研究的重要组成部分, 其在水利工程、水文预报及水库管理中占有重要地位。棱柱体明渠水面线的研究目前已较成熟, 而对于非棱柱体明渠复式河道的水面线相关研究较少。首先从棱柱体明渠水面线分析角度入手, 通过对棱柱体明渠水面线计算公式的分析, 提出变宽度明渠水面线研究要点, 进而从水沙作用的角度出发, 定性分析由于河道冲刷或淤积而发生的水面线变化, 最终得出变宽度复式河道水面线在动床工况下的水面线计算公式。

关键词 非棱柱体明渠; 水面线; 动床; 淤积厚度

中图分类号 TV 143 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2017)12-0184-03

Analysis of Water Surface Profile in the Lotus Root Shape Compound Channels

PANG Jie, LI Te (Yangling Vocational and Technical College, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract Water surface profile is an important content in the research of hydraulics, and it plays an important role in hydraulic engineering, hydrological forecasting and reservoir management. Nowadays, the reearches about water surface profile in prismatic channel have been grown up, while the related research about nonprismatic channel is little. Firstly, the calculation formula of water surface profile in prismatic channel was analyzed, and the point of water surface profile in varied-width open channel was put forward, the changes of water-surface profile because of erosion and sedimentation from the water sand were analyzed, and finally, the calculation formula of water surface profile in the lotus root shape compound channels with the condition of movable bed was obtained.

Key words Nonprismatic channel; Water surface profile; Movable bed; Deposition thickness

天然河道一般为非棱柱体明渠, 其水流多为非均匀流, 讨论其水面曲线的沿程变化规律在实际工程中是十分重要的。例如, 在河道上修建拦河坝, 于是在坝的上、下游形成非均匀流, 这时就要计算出各断面的水深, 绘制出水面曲线, 从而估算出建坝后的淹没范围、回水究竟上溯到何处、移民数量、耕地及厂矿损失等, 才能确保人民财产及生命安全。近年来, 水面线计算在一般的棱柱形渠道方面已日趋成熟^[1-3], 但对于非棱柱体明渠始终存在一定困难。国内学者在近年来对此展开了大量研究。高双聚等^[4]的矛盾分析测定结果与传统理论的水模型试验, 提出了可变宽度渠道水面线的理论分析方法, 不仅解释了原因, 还为明渠变水宽度计算分析提供了理论依据。孙道宗^[5]在非棱柱体明渠非均匀渐变流基础上, 给出水面线的定性和定量分析的基本方程, 利用反算比能量法准确地进行水面线计算。王志力等^[6]、王翰等^[7]通过动能修正系数的改进和综合局部系数的引入, 大大提高山区河段水面线计算的精度, 问题是下游水头大于上游水头。以上均是基于定床工况下水面线的变化情况, 而实际情况中河道会随着水沙作用而发生明显的淤积或冲刷, 因此在水面线分析时就应考虑河床冲刷或淤积的影响。笔者从水沙作用角度出发, 通过分析棱柱体明渠水面线的计算方法从而定性分析动床情况下非棱柱体明渠水面线的变化情况。

1 棱柱体与非棱柱体明渠水面线分析

1.1 棱柱体明渠水面线分析 由于棱柱体明渠较非棱柱体明渠简单, 首先推求出棱柱体明渠的水面线, 再根据实际情况下的天然河道, 并通过一定的简化和假定, 就可以推导出该河道的水面线计算方法。

由文献[1]可知, 明渠的底坡为 $i = \frac{dZ_0}{ds}$, 由能量方程得到

棱柱体明渠中渐变流微分方程:

$$\frac{dh}{ds} = \frac{i - \frac{Q^2}{K^2}}{1 - F_r^2} \quad (1)$$

式中, Z_0 为底部高程(m); s 为断面间距(m); h 为水深(m); i 为底坡坡度; K 为流量模数 (m^3/S); Q 为流量 (m^3/s); F_r 为弗劳德数。当 $dh/ds > 0$ 时, 水流减速流动, 水深沿程增加, 水面线为壅水曲线; 当 $dh/ds < 0$ 时, 水流为加速流动, 继而水深沿程减少, 形态变为降水曲线; 当 $dh/ds = 0$ 时, 水流均匀流动, 水深则沿程不发生变化; 当 $dh/ds \rightarrow 0$ 时, 表示水深沿程变化越来越小, 趋近于均匀流动; 当 $dh/ds = i$ 时, 则水深沿程变化, 但水面保持水平; 当 $dh/ds \rightarrow i$ 时, 表示水面趋近于水平, 或者以水平线为渐近线。

采用分段试验法、水力指数法、数值积分法和简化计算法来进行棱柱形明渠水面线的计算。试算法是计算分段均匀通道过渡流曲线的基本方法, 适用于各种流动条件。

1.2 非棱柱体明渠水面线分析 水流过水断面的形状和尺寸在定床非棱柱体明渠中是沿程随水深及断面位置发生变化的, 即 $A = A(h, s)$, 可以采用分段试算法试算水面线。该方法是基于分段差分方程代替微分方程, 假定在微小段 Δs 上, 水力坡度 J 和断面比能 E_s 是线性变化, 由于结果的精确度受到流段长度的影响, 一般流量不宜过长, 分段愈多其计算精度愈高。公式如下:

$$\Delta s = \frac{E_{s_2} - s_1}{i - J} \quad (2)$$

式中, Δs 为断面微小段; J 为水力坡降; E_s 为断面比能。

对于分段试算法中控制断面的选取, 根据明渠中干扰波的传播特性, 急流区干扰波只能向下游传播, 控制断面在上游, 计算应从上游往下游逐段进行; 对缓流区, 干扰波只能向

上传传播,控制断面在下游,计算应从下游向上游逐段进行。

2 动床情况下的非棱柱体明渠水面线的分析

天然河道中底坡和糙率经常发生变化,使过水断面很不规则,并且还有很多不确定因素。这些因素使河道中的水力要素变化复杂。因此,需分析动床情况下非棱柱体明渠的水面线。以下面的河道情况为例:某一河道由束窄段—开阔段—束窄段这样宽窄相间的变化过程组成。天然河道中水和沙形成两相流,水流挟沙力和床沙质来量的关系造成河床纵向冲淤变化,而河道的抗冲能力和水流本身的冲刷力二者的对抗造成了河道横向变形。水面线讨论的是水位的沿程变化,在动床情况下,河道底坡 i 和水位壅高 Z_b 有关,而水位壅高又与时间、来沙量、来流量及水面比降等密切相关,如此,若要计算出水面线就比较复杂,考虑这些情况并做一定的假设之后给出动床情况下非棱柱体明渠水面线的计算方法。

2.1 断面情况 水流对于某种沉速的泥沙具有一定限度的挟带能力,超过某一限度,如不调整水力因素,将会使得泥沙淤积,河道展宽。例如当遇到汛期洪水流量较大时,上游来沙量将会大于该河段的挟沙能力,且下游束窄段发生水位壅高,使得泥沙淤积在河槽内,使得河道断面变宽,造成河底高程不断抬高,坡度 i 变缓,进而造成水面线抬高,河道断面变宽。若在原有的边墙高度下,可能会造成水流漫溢的情况,对沿岸百姓的生命及财产安全产生威胁。

由于推移质在河道中的比例较小,在此只考虑悬移质泥沙输运。束窄段的断面平均流速为 $U_1 = Q/A_1$, 其中 A_1 为 1-1 过水断面面积。采用张瑞瑾公式计算悬移质泥沙的水流挟沙力:

$$S_{s1} = k \left(\frac{U_1^3}{gRw} \right)^m \quad (3)$$

因此,经过时间 t 后,输沙量可表示为 $G_{b1} = S_{s1}Qt$ 。

式中, U 为断面平均流速 (m/s); A 为断面积 (m^2); S_s 为悬移质泥沙的水流挟沙力 (kg/m^3); g 为重力加速率 (m/s^2); R 为水力半径 (m); w 为泥沙沉降速度 (m/s); k, m 为水流挟沙力系数,可由实测资料确定; G_b 为 t 时间后输沙量 (kg)。

由于输沙不平衡,开阔段内的宽度 B 逐渐增大,过水断面面积随之增大。由连续方程 $U = Q/A$ 可知流量不变时,水流的流速将会变小,因此在某一粒径范围,水流流速将会小于泥沙的起动流速 U_c , 泥沙产生淤积;随着水流宽度进一步增大,流速会继续减小,淤积的泥沙粒径范围增大,即淤积厚度沿程随水流速度的减小而增大。因此,当宽度达到最大 B_{max} 时的断面,即为 2-2 断面 (图 1), 该过水断面面积最大,水流流速最小,淤积厚度达到最大值 Z_b 。

随后,宽度又逐渐变窄,过水断面面积减小,流速增大,部分淤积的泥沙又重新起动,这样原淤积的河床将会产生冲刷。水流流速又不断增大,淤积厚度不断减小,此时断面为 3-3 断面。

同样可知,在 2-2 断面处,对于悬移质挟沙力采用公式:

$$S_{s2} = k \left(\frac{U_2^3}{gRw} \right)^m \quad (4)$$

设 2-2 断面宽度为 B_2 , 则输沙量可表示为 $G_{b2} = S_{s2}Qt$, 故经过时间 t 后,水流从 1-1 断面至 2-2 断面的输沙减少量为 $\Delta G = G_{b1} - G_{b2}$ 。河道平面图如图 1 所示。

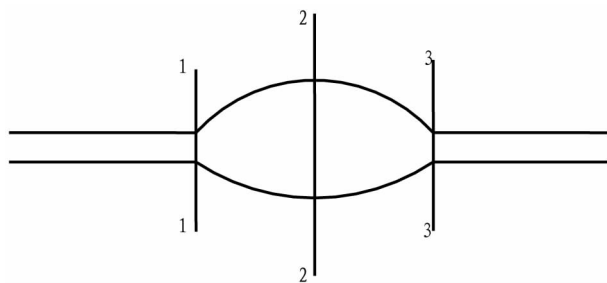


图 1 宽窄相间河道平面

Fig. 1 Lotus root shape compound channels

2.2 淤积厚度 Z_b 由文献 [8] 可知,天然河床演变水水泥沙相互作用,表现为非恒定、非均匀流的物质输移现象,当水流弗劳德数较小时,可忽略惯性力项按流量划分成一系列恒定均匀流,得出淤积厚度如下:

$$Z_b = \frac{2\Delta G}{r' \sqrt{\pi} \sqrt{a}} \quad (5)$$

式中, r' 为泥沙干容重; t 为时间; a 为扩散系数,可按下式确定:

$$a = \frac{K}{r'} \left(\frac{q^{1.5}}{\omega^{1.25}} \right) \quad (6)$$

式中, q 为单宽流量, ω 为沉速, x 为流程, t 为时间,以推移质运动为主时 $K = 0.24$; 以悬移质运动为主时 $K = 0.08$ 。

2.3 未淤积前河道水面线分析与计算 图 2 为明渠水面线分析图,在图 2 中对 1-1 断面和 2-2 断面应用能量方程建立如下:

$$Z_0 + h \cos \theta + \frac{P_a}{v} + \frac{\alpha_2 v^2}{2g} = (Z_0 + d_{s0}) + (h + dh) \cos \theta + \frac{P_a}{v} + \frac{\alpha_2 (v + dv)^2}{2g} + dh_f + dh_j \quad (7)$$

式中, Z_0 为 1-1 断面底部高程 (m); h 为水深 (m); P_a 为大气压强 Pa; v 为断面流速 (m/s); α_1, α_2 为 1-1, 2-2 断面动能修正系数; h_f 为沿程水头损失 (m); h_j 为局部水头损失 (m)。

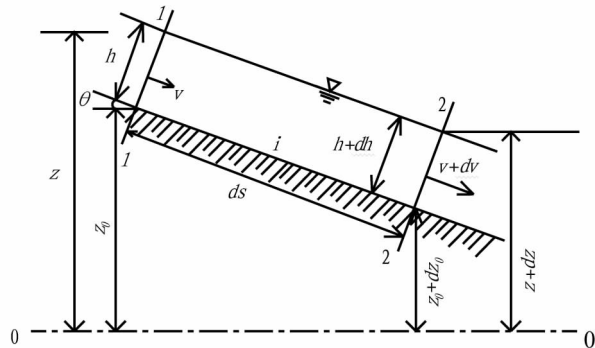


图 2 明渠水面线分析

Fig. 2 Analysis of water surface profile

为了分析此公式可做如下假定:

(1) $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_0$ 。

$$(2) \frac{\alpha(v+dv)^2}{2\alpha} = \frac{\alpha}{2g} [v^2 + 2v dv + (dv)^2] \text{略高阶微量。}$$

$$(3) dh_f \approx J = \frac{Q^2}{K^2} ds = \frac{Q^2}{A^2 C^2 R} ds, \text{其中 } C \text{ 为谢才系数}$$

($m^{1/2}/s$)。在此作了一个近似处理,用均匀流的水头损失来计算微小流段内的非均匀渐变流的水头损失。

$$(4) \text{局部水头损失 } dh_j = \zeta d\left(\frac{v^2}{2g}\right)。$$

(5)由图2可以看出, $dZ_0 = -ids$,若底坡 i 值小于0.1,常用铅直水深代替垂直于槽底的水深,代入上式,那么(7)式就可以写成:

$$ids = dh + (\alpha + \zeta) d\left[\frac{v^2}{2g}\right] + \frac{Q^2}{K^2} ds \quad (8)$$

非棱柱体明渠断面面积随水深和沿程都在变化,即 $A = (h, s)$,所以:

$$\frac{d}{ds} \left[\frac{\alpha v^2}{2g} \right] = \frac{d}{ds} \left(\frac{\alpha Q^2}{2gA^2} \right) = -\frac{\alpha Q^2 dA}{gA^3 ds} = -\frac{\alpha Q^2}{gA^3} \left(\frac{\partial A dA}{\partial h ds} + \frac{\partial A}{\partial s} \right) \quad (9)$$

非棱柱体明渠按渠底宽沿流程的变化可分为渐扩槽和渐缩槽, β 为扩大或收缩系数,对于渐扩槽 $\beta > 0$,渐缩槽 $\beta < 0$ ^[4],该研究的河道断面包括上述情况,把从1-1断面到2-2断面,2-2断面到3-3断面分别等效为对称的直线扩散段和直线收缩段来分析水面线,则水深沿流程变化的微分方程可写为如下形式:

$$\frac{dh}{ds} = \frac{i - \bar{J} + (\alpha + \zeta) \frac{Q^2 \partial A}{gA^3 \partial s}}{1 - (\alpha + \zeta) \frac{Q^2 B}{gA^3}} \quad (10)$$

式中, A 为过水断面面积,对梯形断面 $A = (b_1 + \beta s)h + mh^2$,矩形断面 $A = (b_1 + \beta s)h$,其中 b 为渠道底宽(m); β 为扩大或收缩系数; m 为边坡系数。那么:

$$\frac{\partial A}{\partial s} = \beta h \quad (11)$$

令 $\frac{\alpha Q^2 B}{gA^3} = F_r^2$,并将(11)式代入式(10)得到:

$$\frac{dh}{ds} = \frac{i - \left(\bar{J} - \frac{\alpha Q^2 \beta h}{gA^3}\right)}{1 - F_r^2} = \frac{i - \left(\bar{J} - F_r^2 \frac{\beta h}{B}\right)}{1 - F_r^2} \quad (12)$$

式中, B 为水面宽度,式(12)即为非棱柱体明渠非均匀渐变流水面线分析的基本方程。

2.4 计算底坡 由于淤积前,河床的底坡为 i ,对于1-1~2-2断面,由于河床淤积,所以河底坡变缓,此时的河底坡 i'_1 可用下式表示:

$$i'_1 = \frac{is - Z_b}{s} \quad (13)$$

而对于2-2~3-3断面,由于河道变窄,过水断面面积变小,流量不变的情况下流速变大,所以河床冲刷,河底坡变陡,此时的河底坡 i'_2 可表示如下:

$$i'_2 = \frac{i'_1 s - Z_b}{s} \quad (14)$$

将(5)代入(13)、(14)式可计算出1-1~2-2和2-2~3-3断面的河床底坡。

2.5 淤积后水面线分析 将(13)式代入(12)式可以得到由于泥沙淤积而发生变化的水深沿程变化的规律:

$$\frac{dh}{ds} = \frac{\frac{i_s - Z_b}{s} - \left(J - \frac{\alpha Q^2 \beta h}{gA^3}\right)}{1 - F_r^2} \quad (15)$$

此时的(15)式就是要求的淤积后即2-2断面的水深沿程变化的微分方程形式。

将(14)式代入(12)式可以得到由于泥沙冲刷而发生变化的水深沿程变化的规律:

$$\frac{dh}{ds} = \frac{\frac{i_s - 2Z_b}{s} - \left(J - \frac{\alpha Q^2 \beta h}{gA^3}\right)}{1 - F_r^2} \quad (16)$$

此时(16)式就是要求的冲刷后即3-3断面的水深沿程变化的微分方程形式。

3 结论

天然河道属于动床情况,其泥沙淤积数量和淤积形态主要受来水来沙、地形的影响,尤其遭遇大洪水时,促使泥沙淤积,抬高河床高程,这就会使河道水面线随之发生变化。上述方法很好地解决了最大洪峰和最大泥沙淤积高度时的水面线,从而定出安全的边墙高度。

参考文献

- [1] 张志昌. 水力学:下册[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.
- [2] 张志昌. 水力学:上册[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.
- [3] 李建中. 水力学[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2002.
- [4] 高双聚,杨玲霞. 变宽度明渠水面线的分析[J]. 郑州工程学院学报,1994,15(3):41-44.
- [5] 孙道宗. 非棱柱体明渠非均匀渐变流水面线定性分析与计算[J]. 江西水利科技,1996,22(4):205-212.
- [6] 王志力,耿艳芬,金生. 山区性河流水面线计算改进[J]. 大连理工大学学报,2005,43(5):433-437.
- [7] 王翰,田发美,吕宏兴. 山区渐扩性河流水面线计算改进[J]. 人民黄河,2007,29(5):66-67.
- [8] 刘清朝. 水科学青年学术论文集:水力学·水文水资源·泥沙·水环境[C]. 北京:水利水电出版社,1990.
- [9] 裴国霞,唐朝春. 水力学[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [10] 张小峰. 河流动力学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.
- [11] 孙东坡,李国庆. 治河及泥沙工程[M]. 郑州:黄河水利出版社,1999.
- [12] 梁志勇,徐永年. 引水防沙与河床演变[M]. 北京:中国建材工业出版社,2000.

(上接第183页)

- [5] 高荣,钱爱国,雷丰泽. 水土流失防治中加强临时措施应用的几点思考[J]. 中国水土保持,2012,20(12):40-41.
- [6] 住房城乡建设部. 海绵城市建设技术指南:低影响开发雨水系统构建(试行)[R]. 2014.
- [7] 晋存田,赵树旗,闫肖丽,等. 透水砖和下巴式绿地对城市雨洪的影响

[J]. 中国给水排水,2010,26(1):40-46.

- [8] 李海燕,魏鹏,贾朝阳,等. 渗排植被浅沟应用于处置路面径流案例研究[J]. 环境工程学报,2014,8(3):821-826.
- [9] 罗红梅,车伍,李俊奇,等. 雨水花园在雨洪控制与利用中的应用[J]. 中国给水排水,2008,24(6):48-52.