

非标准马蹄形断面隧洞的水力计算研究

魏炳乾, 庞洁, 严培, 刘枫彬

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 马蹄形过水断面为无压隧洞较常采用的形式,但断面形式复杂使其水力计算变得十分困难。通过数学推导,给出了6圆弧马蹄形断面的水力要素计算公式;分别采用谢才公式和临界流方程,推导了顶拱和上侧拱所对应的圆心角的迭代公式,进而给出了正常水深和临界水深的计算公式,并将之应用于引汉济渭工程秦岭无压隧洞的水面线计算之中。结果表明:水面线形态与定性分析结果相符,计算简单、结果可靠,可为工程实例中类似断面形状的水力计算提供参考。

关键词: 水力要素; 正常水深; 临界水深; 马蹄形断面; 水面线

中图分类号:TV133.1

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2014)05-0237-04

Study on hydraulic calculation of non standard horseshoe section tunnel

WEI Bingqian, PANG Jie, YAN Pei, LIU Fengbin

(Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Horseshoe cross section is commonly used for open-channel flow tunnel, but the section make hydraulic calculation become difficult because of its complex. The paper gave the formulas of hydraulic elements for 6 cambered horseshoe sections through mathematical deduction. It used Chezy formula and critical flow equation to deduce the iterative formula of corresponding central angle of top arch and upper arch, then gave the calculation formula of normal depth and critical depth. The method is applied to calculate water surface profile in Qinling tunnel of Hanjiang-to-Weihe water project. The result shows that the morphology of water surface profile meet the qualitative analysis results. The calculation process is simple and reliable and can provide reference for the hydraulic calculation of other project.

Key words: hydraulic element; normal depth; critical depth; horseshoe cross section; water surface profile

1 研究背景

马蹄形过水断面具有水流条件好、受力性能优越等特点,因此该种断面形式的隧洞在水利水电及供排水工程中得到越来越广泛的应用。在水力计算中,由于马蹄形过水断面的几何形状与其它常用断面相比较为复杂,故其正常水深和临界水深等重要参数的水力计算较为复杂。文献[1-5]对标准马蹄形断面的临界水深和正常水深进行了研究;文献[6-7]对明渠流水力迭代算法进行了研究;文献[8]从明渠均匀流公式出发,研究了3种工况下标准I型马蹄形断面正常水深的迭代公式。这些文献

研究的都是由4段圆弧构成的标准I、II型的马蹄形断面;而对6段圆弧构成的非标准马蹄形断面的研究还较匮乏。因此,本文对由6段圆弧构成的非标准马蹄形断面的正常水深、临界水深以及水力要素的计算进行研究,并将之应用于陕西省引汉济渭工程秦岭隧洞的水面线计算。

引汉济渭工程秦岭隧洞南起三河口水库坝后右岸下游300 m处的汇流池,北端起点出口位于渭河一级支流黑河右侧支沟黄池沟内,隧洞设计流量 $70\text{ m}^3/\text{s}$,全长81.68 km,设计纵比降 $1/2500$,进口底板高程537.17 m,出口底板高程510.0 m,见图1;隧洞横断面多为6段圆弧构成的非标准马蹄形复合衬

砌断面,如图 2 所示。



图 1 陕西省引汉济渭工程

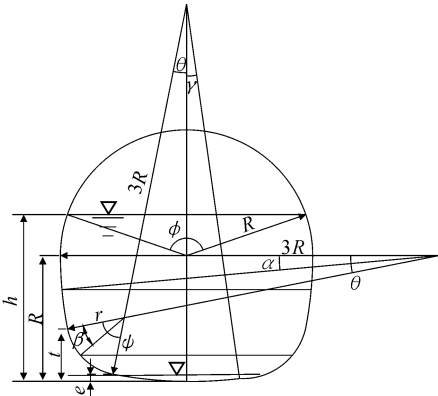


图 2 6 圆弧构成的非标准马蹄形断面不同水深示意

2 过水断面水力要素

本文研究的非标准马蹄形过水断面比较复杂,由 6 段圆弧曲线构成,底拱半径和上侧拱半径均为顶拱半径的 3 倍,下侧拱半径为顶拱半径的 0.444 倍,且过水断面的水力要素随水深变化而变化,如图 2 和表 1 所示。图中 R 为顶拱半径; $3R$ 为底拱和上侧拱半径; r 为下侧拱半径; 2θ 为底拱的圆心角; $\theta = 0.199\text{ rad}$ 为上侧拱的圆心角; $\psi = 5.89\theta$ 为下侧拱的圆心角;为过水断面顶拱对应的圆心角; α 、 β 分别为过水断面上、下侧拱对应的圆心角; γ 为过水断面底拱对应圆心角的一半;角度单位均为 rad。

经推导可得各种情况下非标准马蹄形断面水力要素如表 1 所示。

3 非标准马蹄形断面的正常水深与临界水深

正常水深采用明渠均匀流的谢才公式计算^[9]:

Q = 1/n * A^(5/3) / chi^(2/3) J^(1/2) (1)

明渠水流流态可分为缓流、急流、临界流。断面比能最小的水流就是临界流,其水深即为临界水深。

表 1 非标准马蹄形断面的水力要素

	m, m ²			
水深	$R \leq h < 2R$	$t \leq h < R$	$e \leq h < t$	$0 \leq h < e$
范围	$0 < \phi \leq \pi$	$0 < \alpha \leq \theta$	$0 < \beta \leq \Psi$	$0 < \gamma \leq \theta$
过水面积 A	$R^2(3.3635 + 0.5\sin\phi - \frac{\phi}{2})$	$R^2[1.7927 - 9\alpha - \frac{9}{2}\sin(2\alpha) + 12\sin\alpha]$	$R^2(0.314 + 0.197\beta - 0.479\sin\beta - 0.0967\cos\beta - 0.0565\cos2\beta - 0.0831\sin2\beta)$	$R^2(9\gamma - 4.5\sin(2\gamma))$
湿周 χ	$R(6.5720 - \phi)$	$R(-6\alpha + 3.4304)$	$R(2.2356 - 0.8876\beta)$	$6R\gamma$
水深 h	$R[1 + \cos(\frac{\phi}{2})]$	$R(1 - 3\sin\alpha)$	$R[0.4943 - 0.4438\sin(\beta + \theta)]$	$3R(1 - \cos\gamma)$
水面宽度 B	$2R\sin(\frac{\phi}{2})$	$2R(3\cos\alpha - 2)$	$R(0.9093 + 0.4350\cos\beta - 0.08780\sin\beta)$	$6R\sin\gamma$

临界流的方程为^[9]:

alpha_k Q^2 / g = A_k^3 / B_k (2)

式中: Q 为流量, m^3/s ; A 过水断面面积, m^2 ; n 为渠道糙率; J 为渠底坡度; χ 为湿周, m ; A_k 为临界流对应的过水断面面积, m^2 ; B_k 为临界流对应的水面宽度, m ; g 为重力加速度, 取 9.8 m/s^2 ; α_k 为动能修正系数, 取 1.0。

3.1 正常水深

由图 2 及表 2 所示的非标准马蹄形断面的水力要素可知,3 个特殊水深位置 (R 、 t 、 e) 时的过水流量 Q_{R0} 、 Q_{t0} 、 Q_{e0} 的计算公式可由公式(1) 出发推导而出,如表 2 所示。而实际流量及其正常水深与该 3 个特殊水深位置时的流量可能有以下四种情况:① 当 $Q \geq Q_{R0}$ 时, $h_0 \geq R$;② 当 $Q_{t0} \leq Q < Q_{R0}$ 时, $t \leq h_0$

$< R$;③当 $Q_{e0} \leq Q < Q_{t0}$ 时, $e \leq h_0 < t$;④当 $0 \leq Q < Q_{e0}$ 时, $0 \leq h_0 < e$ 。那么应用时可由实际流量与 Q_{R0} 、 Q_{t0} 、 Q_{e0} 的对比关系判定该流量下的正常水深所处的位置,进而,应用相应的水力要素及式(1) 确定正常水深计算时应采用的公式。

表 2 马蹄形在 3 个特殊位置正常水深时的流量公式			
正常水深	$h_0 = R$	$h_0 = t$	$h_0 = e$
正常水深所	$Q_{R0} =$	$Q_{t0} =$	$Q_{e0} =$
对应的流量	$1.1631 \frac{R^{\frac{8}{3}} J^{\frac{1}{2}}}{n}$	$0.2701 \frac{R^{\frac{8}{3}} J^{\frac{1}{2}}}{n}$	$0.005 \frac{R^{\frac{8}{3}} J^{\frac{1}{2}}}{n}$

由引汉济渭工程资料可知,坡降 $J = 1/2500$,糙率 $n = 0.014$,顶拱半径 $R = 3.38 \text{ m}$,流量 $Q = 70 \text{ m}^3/\text{s}$ 。由表 2 所列公式计算可得正常水深在 R 、 t 、 e 时的流量分别为 $Q_{R0} = 42.75 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $Q_{t0} = 9.93 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $Q_{e0} = 0.202 \text{ m}^3/\text{s}$;因 $Q > Q_{R0}$,所以正常水深 $h_0 > R$ 。将 $h_0 > R$ 时的 A_X 代入公式(1) 可得迭代公式:

$$\phi^{j+1} = 2[3.3635 + 0.5\sin\phi^j - (\frac{nQ}{J})^{0.6} \cdot \frac{(6.5720 - \phi^j)^{0.4}}{R^{1.6}}], (\phi \text{ 的初始值取 } \pi) \quad (3)$$

式中:变量上标($j+1$)或(j)为变量的迭代次数;其他符号意义同前。

计算得 $\phi = 2.223 \text{ rad}$,进而将 ϕ 代入表 1 中 $R \leq h < 2R$ 时的公式 $h = R[1 + \cos(\frac{\phi}{2})]$ 中,可得非标准马蹄形断面的正常水深 $h_0 = 4.879 \text{ m}$ 。

3.2 临界水深

临界水深与正常水深的计算过程类似,3 个特殊水深位置 (R 、 t 、 e) 时的过水流量 Q_{RK} 、 Q_{tK} 、 Q_{eK} 的计算公式也可由公式(2) 推导而出,见表 3。

表 3 马蹄形在 3 个特殊位置临界水深时的流量公式			
临界水深	$h_K = R$	$h_K = t$	$h_K = e$
临界水深所	$Q_{RK} =$	$Q_{tK} =$	$Q_{eK} =$
对应的流量	$1.6973 \sqrt{gR^5}$	$0.3638 \sqrt{gR^5}$	$0.00942 \sqrt{gR^5}$

而实际流量及其临界水深与该 3 个特殊水深位置时的流量相比较可能有 4 种情况:①当 $Q \geq Q_{RK}$ 时, $h_K \geq R$;②当 $Q_{tK} \leq Q < Q_{RK}$ 时, $t \leq h_K < R$;③当 $Q_{eK} \leq Q < Q_{tK}$ 时, $e \leq h_K < t$;④当 $0 \leq Q < Q_{eK}$ 时 $0 \leq h_K < e$ 。那么应用时可由实际流量与 Q_{RK} 、 Q_{tK} 、 Q_{eK} 的对比关系判定该流量下的临界水深所处的位置,进而应用相应的水力要素及式(2) 确定临界水

深计算时应采用的公式。

根据工程已知资料,可计算临界水深分别为 R 、 t 、 e 时的流量分别为 $Q_{RK} = 115.60 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $Q_{tK} = 23.92 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $Q_{eK} = 0.619 \text{ m}^3/\text{s}$,因 $Q_{tK} < Q < Q_{RK}$,所以 $t < h_K < R$ 。把 $t \leq h_K < R$ 时的 A 、 B 代入式(2) 下迭代公式:

$$\alpha^{(j+1)} = \frac{1}{9}[1.7927 - \frac{9}{2}\sin(2\alpha^{(j)} + 12\sin\alpha - \sqrt[3]{\frac{2Q^2(3\cos\alpha^{(j)} - 2)}{gR^5}})], (\alpha \text{ 的初始值取 } \theta) \quad (4)$$

经迭代计算得 $\alpha = 0.081 \text{ rad}$ 。进而将 α 代入表(1) 中 $t \leq h < R$ 时公式 $h = R(1 - 3\sin\alpha)$ 中,可得非标准马蹄形断面临界水深 $h_K = 2.56 \text{ m}$ 。

4 水面线计算

对于超长无压流隧洞的马蹄形过水断面,其正常水深、临界水深、渐变段水深、隧洞壅水及降水时水深的计算乃是工程设计时水力计算的主要任务,由于 Excel 电子表格是一个成熟的数据计算与分析平台,它集成了最优秀的数据计算与分析功能,具有自动运算、计算精度高且可操作性强的优点,近年来,通过创建电子表格,在 excel 的帮助下进行水面线计算日趋便利^[10]。

天然河道水面线的计算多采用不计局部水头损失的能量方程(差分形式)进行逐段推算。本文将明流隧洞划分成若干流段,然后对每段流长 ΔS ,应用下式,由流段的已知断面推求未知断面,最后进行逐段推算^[9,11]。

$$\Delta S = \frac{\Delta E_s}{(i - \bar{J})} = \frac{E_{sd} - E_{su}}{(i - \bar{J})} \quad (5)$$

式中:断面比能 $E_s = h + \frac{\alpha v^2}{2g} = h + \frac{\alpha}{2g}(\frac{Q}{A})^2$;平均水面坡降 $\bar{J} = \frac{1}{2}(J_d + J_u)$;水面坡降 $J = \frac{v^2}{C^2 R}$;谢才

系数 $C = \frac{1}{n}R^{\frac{1}{6}}$;水力半径 $R = \frac{A}{\chi}$; ΔE_s 为流段的上下游断面的断面比能差值, E_{sd} 、 E_{su} 分别为下游及上游断面的断面比能, m ; R 为水力半径, m ; i 为底坡比降; v 为断面平均流速, m/s ;其他符号意义同前。

已知陕西省引汉济渭工程流段末的水深和流段长 S ,将流段分成 n 等分,称之为子流段,由于流段末端水深已知,进口端水深未知,故计算时可假定第 n 子流段初端的水深,代入式(5) 算得一个 ΔS ,将此 ΔS 与已知第 n 子流段长比较,若相等则假定水深即

为第 n 子流段初端水深,若不等则需重新假设,一直算到 ΔS 与第 n 子流段长相等为止。将所求水深代入第 $n-1$ 子流段计算,依次循环进行,最后可得流段进口端水深。

水面线计算前应判断水面线类型。水面线类型可通过水深比较来判断: $h_0 > h_K$ 时为缓流; $h_0 = h_K$ 时为临界流; $h_0 < h_K$ 时为急流。由于本工程各断面的均匀流水深均大于临界水深;即:非标准马蹄形断面 $h_0 = 4.879 \text{ m} > h_K = 2.56 \text{ m}$,故水流为缓流。

以非标准马蹄形断面为例的水面线计算图 3。由图 3 可知,水面曲线为壅水曲线,符合水面线定性分析结果,计算所得的净空比均大于 15% (隧洞净空比是指隧洞衬砌内轮廓线与水面线之间所包围的空间面积和隧洞整个断面面积的比值),满足规范要求。

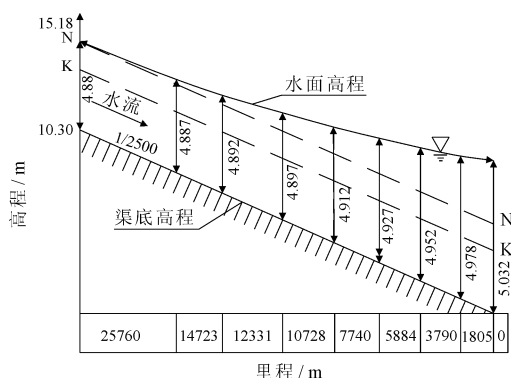


图 3 非标准马蹄形断面隧洞的水面曲线

5 结 语

本文通过数学推导,给出了 6 弧形马蹄形断面的水力要素计算公式;分别采用谢才公式和临界流

方程,推导了顶拱和上侧拱所对应的圆心角 φ 、 α 的迭代公式,进而给出了正常水深和临界水深的计算公式,并将之应用于引汉济渭工程秦岭无压隧洞的水面线计算之中,进行了水力计算和水面线验证。结果表明:水面曲线为壅水曲线,符合水面线定性分析结果,该迭代公式计算简单、结果可靠,可为工程实例中类似断面形状的水力计算提供参考。

参考文献:

- [1] 滕凯. 马蹄形断面隧洞正常水深的简化计算法[J]. 华北水利水电学院学报, 2013, 34(5): 31-34+76.
- [2] 王正中, 陈涛, 芦琴, 等. 马蹄形断面隧洞临界水深的直接计算[J]. 水力发电学报, 2005, 24(5): 95-98.
- [3] 张宽地, 吕宏兴, 陈俊英. 马蹄形过水断面临界水深的直接计算法[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 15-18.
- [4] 李风玲, 文辉, 赵洁, 等. 平底 I 型马蹄形断面正常水深的显式计算式[J]. 人民黄河, 2014, 36(4): 117-119.
- [5] 吕宏兴, 辛全才, 花立峰. 马蹄形过水断面正常水深的迭代计算[J]. 长江科学院院报, 2001, 18(3): 7-10.
- [6] 陆建伟. 迭代法在明渠流水深计算中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2010(17): 15-16.
- [7] 吕宏兴, 把多铎, 宋松柏. 无压流圆形断面水力计算的迭代法[J]. 长江科学院院报, 2003, 20(5): 15-17.
- [8] 张志昌, 李若冰. 标准 I 型马蹄形断面水力特性的研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(5): 55-59.
- [9] 吴持恭. 水力学(第三版)上册[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [10] 林炎烽. Excel、autoCAD 软件在水面线推求中的应用[J]. 水利科技, 2010(2): 33-34.
- [11] 王庆, 洪滨. 端芬河整治工程河流设计水面线的推算[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(4): 148-150+159.