

淹没齿型丁坝阻力与壅水响应关系试验研究*

闫杰超¹, 李社生², 焦增祥³

(1. 中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430050;
2. 中交四航局港湾工程设计院有限公司, 广东 广州 510290; 3. 南昌工程学院, 江西南昌 330099)

摘要: 为研究淹没齿型丁坝阻力与其壅水响应关系, 利用物理水槽试验与理论分析相结合的方法, 建立了淹没齿型丁坝阻力系数计算方法, 其阻力系数大小主要与无量纲淹没度与相对坝长相关。进而采用动量守恒的方法构建了阻力系数与壅水效应相关联的淹没齿型丁坝壅水预测模型。通过实测数据对壅水预测模型进行验证, 计算结果与水槽试验数据符合良好。研究成果可为其他形式丁坝或相关涉及建筑物阻力与壅水效应研究提供参考与借鉴。

关键词: 淹没齿型丁坝; 动量守恒; 阻力系数; 墉水

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)04-0086-05

Experimental study on relationship between resistance of submerged tooth spur dike and its backwater response

YAN Jie-chao¹, LI She-sheng², JIAO Zeng-xiang³

(1.China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430050, China;

2.CCCC FHEC Harbor Engineering Design Co., Ltd., Guangzhou 510290, China;

3.Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

Abstract: To study the relationship between the resistance of the submerged tooth spur dike and its backwater response, a method for calculating the drag coefficient of submerged tooth spur dike is established by using a combination of physical flume tests and theoretical analysis. The drag coefficient is mainly related to the dimensionless submergence degree and relative dam length. Furthermore, the method of conservation of momentum is used to construct the backwater prediction model of the submerged tooth spur dike which is related to the drag coefficient and backwater effect. The backwater prediction model is verified by the measured data, and the calculated results are in good agreement with the experimental data. The results can be used as a reference for the study of the drag and backwater effects of other types of spur dike or buildings involved.

Keywords: submerged tooth spur dike; momentum conservation; drag coefficient; backwater

丁坝是航道整治中应用普遍的整治建筑物之一。丁坝坝根与河岸或导堤相连接, 坎头伸向河心, 坎轴线与水流方向正交或斜交, 主要被应用于河道疏导与保护河岸冲刷。丁坝工程的应用可以增加主槽水深以改善通航条件, 或增加泥沙的输运以减少航道疏浚的开支。但丁坝修建后, 原

有河床束窄, 改变了水流条件, 增加了局部水头损失, 从而引起丁坝上游水面壅高, 给河道行洪带来负面影响^[1]。在洪水期, 丁坝的壅水效应很可能增大洪水风险, 引起漫堤甚至溃堤, 对人民生命财产造成巨大的威胁与损害^[2]。研究表明, 过去一个世纪, 大量水利工程的兴建, 使得密西

收稿日期: 2020-06-27

*基金项目: 交通运输部建设科技项目(2016YFC0402307)

作者简介: 闫杰超(1990—)男, 硕士, 助理工程师, 从事河口及近海水沙及波浪模拟研究。

通讯作者: 焦增祥(1987—)男, 博士, 讲师, 从事河口及近海水沙动力模拟研究。E-mail: 406998986@qq.com。

西北河中部与密苏里河下游部分河段水位平均上升2~4 m。Criss与Shock^[3]研究发现, 当大量丁坝或潜堤工程修建后, 河道的糙率增大, 对洪水位影响明显。刘长波^[4]指出长江沿岸修建码头增大了水流综合糙率, 与无码头时水流的糙率相比, 综合糙率的增大程度从单个码头的16.52%到两个码头的66.09%, 说明码头产生阻力与码头数量、码头间距及尺寸结构有关。Pinter等^[5]通过追踪并对常流量时期密西西比河与密苏里河水位变化规律进行研究, 证实密西西比河与密苏里河水位增加的原因仅仅是由于大量丁坝建设造成的。

目前, 对淹没丁坝壅水的研究通常采用能量守恒与动量守恒两种方法。孔祥柏等^[6]通过大量实测资料, 计算考虑坝体上、下游的局部水头损失, 得到单丁坝在非淹没与淹没状态下, 潜坝局部水头损失系数的经验关系。应强等^[7]根据流体力学理论, 将非淹没丁坝的研究成果应用于淹没丁坝, 应用建坝前后能量方程并结合试验资料, 拟合出不同间距淹没丁坝的壅水公式。应强^[8]通过水槽试验, 采用量纲分析的方法, 结合试验资料提出了过坝流量与丁坝淹没度、束窄程度及断面宽深比的计算公式, 进而推导出淹没丁坝坝前最大壅水值计算公式。Oak等^[9]通过水槽试验, 建立丁坝前后断面动量守恒方程, 结合实测资料进行相关分析, 得出Oak与Smith壅水方程。Azinfar等^[10]建立引入丁坝拖曳力系数的动量方程, 通过对Oak实测数据以及两种坝型水槽试验数据分析, 推导出多因素壅水预测模型方程。

淹没丁坝的壅水, 实质是丁坝修建后, 对水流力的作用效应。国内对于壅水的研究, 大多通过物理模型试验从丁坝断面能量变化的角度研究坝前壅水或者最大壅水, 鲜有通过丁坝阻力对丁坝壅水效应展开理论研究的。因此, 本文基于动量守恒的方法, 首先通过对丁坝阻力系数进行量纲分析, 建立丁坝阻力系数的计算方法; 进而得出其与丁坝壅水效应之间的响应关系, 具有重要的理论意义。同时, 丁坝壅水特别是洪水期的壅高对工程具有实际的指导意义, 这关系到河道的

行洪能力和防洪安全, 因此有必要对此开展理论与试验研究。

1 理论分析

1.1 壅水模型建立

任何处于水流中的天然或者工程障碍物, 都要受到水流的冲击效应, 造成水流能量损失, 同时障碍物上游水位会升高, 称为壅水效应。对于丁坝或者潜堤等整治建筑物, 由于水流黏性以及边界层的分离效应, 产生水流对丁坝的拖曳力。研究认为, 淹没丁坝的能量损失以及壅水效应主要是由拖曳力引起的。

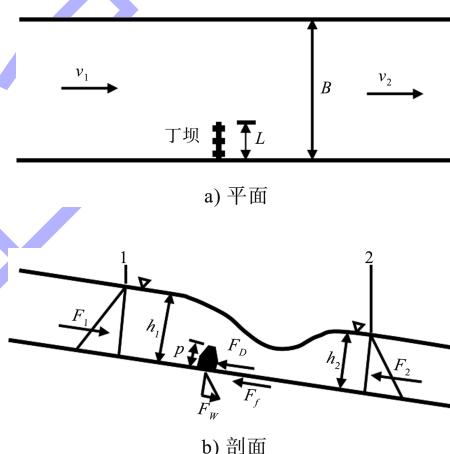


图1 丁坝布置

本文采用动量守恒的方法对淹没丁坝壅水效应展开研究。如图1所示, 在断面1与断面2之间建立水流方向的一维动量方程:

$$F_1 - F_2 - F_D - F_f + F_w = \rho Q (\beta_2 v_2 - \beta_1 v_1) \quad (1)$$

式中: $F_1 = \rho g B h_1^2 / 2$, 为断面1处静水压力; $F_2 = \rho g B h_2^2 / 2$ 为断面2处静水压力; $F_D = C_D \rho v^2 A / 2$, 为水流拖曳力; F_f 为断面1与断面2之间壁面摩擦力; F_w 为断面1与断面2之间水体沿水流方向的重力分量; ρ 为水流密度; Q 为流量; β_1 和 β_2 分别为断面1与断面2的动量修正系数; B 为河宽; h_1 、 h_2 分别为断面1、2处的水深; v_1 和 v_2 分别为断面1与断面2的平均流速。

对于均匀或渐变流态, 假定断面1与断面2之间壁面摩擦阻力与水流重力分量近似相等, 即 $F_f = F_w$ 。同时, 动量分析中假定动量修正系数 β_1

和 β_2 等于 1。因此，方程(1)可表示为：

$$F_1 - F_2 - F_D = \rho Q(v_2 - v_1) \quad (2)$$

其中拖曳力 F_D 可以被表达为：

$$F_D = C_D \rho v_1^2 A / 2 \quad (3)$$

式中： C_D 为阻力系数； A 为水流作用丁坝的投影面积； v_1 为断面 1 处平均流速。

对于垂直水流方向布置的淹没丁坝， $A = PL$ ， P 为坝高， L 为坝长。因此式(2)可变换为：

$$\frac{1}{2} \rho g B h_1 - \frac{1}{2} \rho g B h_2 - C_D A \rho v_1^2 / 2 = \rho Q(v_2 - v_1) \quad (4)$$

联合连续方程对式(4)作进一步推导得：

$$2Fr_1^2(h_1/h_2)^3 - (2Fr_1^2 - C_D A_r Fr_1^2 + 1)(h_1/h_2)^2 + 1 = 0 \quad (5)$$

式中： Fr_1 为断面 1 处弗劳德数； $A_r = A/(Bh_1)$ 为阻水比。

假定上游水流条件、丁坝参数以及拖曳力系数已知，通过方程(5)可求解出 h_1/h_2 ，进而得出壅水。就目前而言，壅水求解的关键在于阻力系数 C_D 的求解。

1.2 阻力系数 C_D 影响因素量纲分析

当天然或工程河道布置丁坝或潜堤等整治建筑物后，产生丁坝对水流的阻击力，由于水流不断作用，致使坝前压强沿程增大、流速减小，同时，水流过流断面面积减小，水流流线在上游收缩，形成壅水。由此看出，丁坝壅水效应的实质是丁坝对水流的阻力作用引起的。因此，求解阻力系数 C_D ，应结合影响丁坝壅水的水力要素综合研究。

对于丁坝壅水试验研究，均匀流或者渐变流的定流工作必不可少。通常，定流的关键在于水流变量(U_0 平均流速)与水槽平均坡度 S_0 之间的调整。定流后丁坝的布置将改变原有水流结构，引起壅水。不同的丁坝尺寸(坝长 L 、坝宽 W 、坝高 P)及坝型特征(Δ 形状系数)将对水流产生不同阻力的作用，进而表现为不同的壅水效应。因此，影响丁坝壅水或者丁坝阻力效应的变量通常如下： ρ 、 σ 、 ν 、 S_0 、 U_0 、 g 、 L 、 W 、 P 、 B 、 Δ ，其中 σ 和 ν 分别为水流表面张力和运动黏滞系数。

通过引进因变量水深 h 对上述变量进行无量

纲化处理可以得到如下无量纲变量组： S_0 、 Re 、 Fr 、 W 、 L/B 、 h/P 、 Δ ，其中： $Re = U_0 R / \nu$ 为水流雷诺数，表示黏性对流场的影响， R 为水流力半径； $Fr = U_0 / \sqrt{gh}$ 为水流弗劳德数，表示惯性力对水流的影响，其中 h 为上游来流水深； $W = \rho U_0^2 L / \sigma$ 为水流韦伯数，表示表面张力对液面的影响； L/B 为相对坝长。

对于类似丁坝或潜堤等发展充分的湍流流场，可忽略黏性效应对水流的影响，即雷诺数的影响。同时，韦伯数通常用于对自由液面流动的研究。因此，结合上述量纲分析可表达拖曳力系数函数关系为：

$$C_D = f(Fr, L/B, h/P, \Delta) \quad (6)$$

对于方程(6)，无量纲数 L/B 、 h/P 与 Δ 在物理意义上是相互独立的。对于特定的丁坝坝型，形状系数 Δ 可认为是特定的影响因子 k 。对于 h/P 与 Fr 之间的相关关系，Oak's^[11] 通过 SPSS 分析淹没度 h/P 与弗劳德数 Fr 之间的协方差，认为它们之间并没有明显的相关关系。Klaka 等^[12] 通过对二维平板拖曳力系数进行研究发现弗劳德数是边缘的拖曳力系数影响因子。Azinfar^[13] 认为当弗劳德数大于 0.1 时，弗劳德数对拖曳力系数影响不大。基于本文弗劳德数介于 0.059~0.187 以及新型堤身构件壅水效应的复杂性，仅考虑淹没度与相对坝长的影响。因此，方程(6)可表示为：

$$C_D = k f_1(L/B) f_2(h/P) \quad (7)$$

2 试验概况

用于壅水预测模型建立的实测数据试验在长 40 m、宽 1.85 m、深 0.5 m、底坡 $i = 0.000\ 67$ (1/1 500)、糙率为 0.012 的水泥剖面水槽中完成。丁坝坝身采用长江南京以下 12.5 m 深水航道整治一期工程通州沙狼山沙河段整治工程中的齿型坝身构件。试验中采用单个齿形构件长 L 为 21 cm、坝高 P 为 13.5 cm(图 2)。考虑多因素水力要素对丁坝壅水的影响，共进行 53 组水槽试验，每组测量 3 次。其中，试验坝长为 $L \sim 9L$ ；试验水深 h_1 为 25~35 cm；上游进口弗劳德数 Fr_1 为 0.059~0.187。

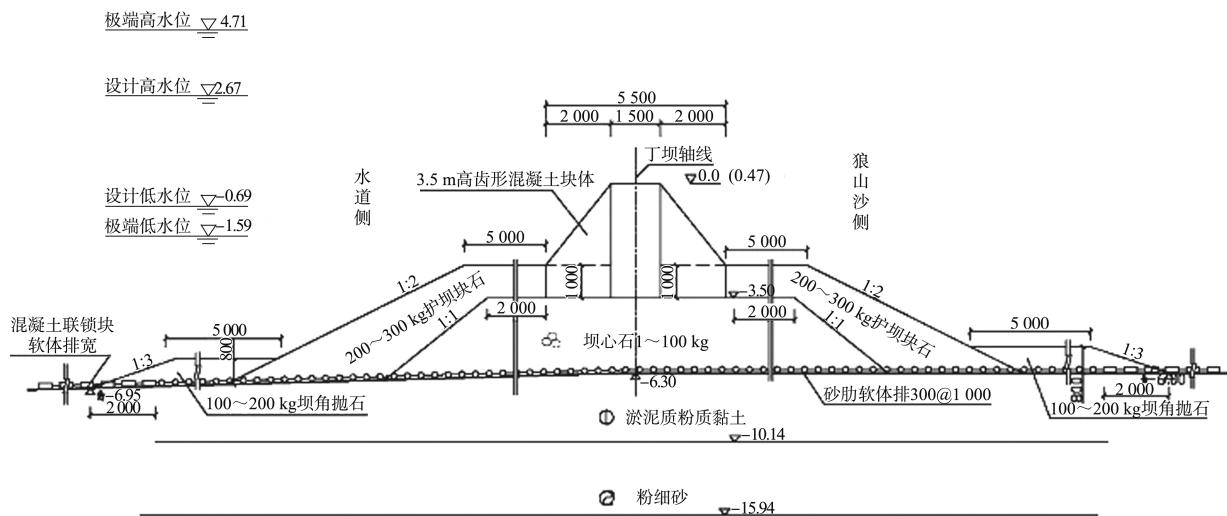


图2 通州沙狼山沙河段整治工程中的齿型坝身构件结构(高程: m; 尺寸: mm)

丁坝布置于模型19号断面(即水槽上游起19 m处), 其测力仪布置于丁坝断面。水面线测量采用毕托管, 其沿程水面线测量布置于16~27号断面, 距离丁坝较远断面采用1.0 m间隔布置, 距离丁坝上游较近断面采用0.15 m间隔布置, 丁坝下游较近断面采用0.25 m间隔布置, 其下游较远处采用1.0 m间隔布置。图1中断面1为坝前壅水最大值断面, 其值及位置根据沿程水面线测量结果取值, 而断面2为坝后水流恢复段水深, 采用26或27号断面即可。

3 试验结果分析

3.1 齿型丁坝阻力系数计算模型建立

齿型坝身构件水槽试验通过改变基床高度、水深及流速等影响因子对齿型坝身构件展开水流力多因素影响研究, 通过量纲分析考虑淹没度与相对坝长两个主要影响因素拟合实测资料得到形如方程(7)的水流阻力系数函数式:

$$C_D = k g (P/h)^{4.19} e^{2.34 \frac{L}{B}} \quad (8)$$

式中: $k=8.2$, 为形状阻力平均值; P/h 为相对堤高, 等于淹没度 h/P 的倒数。同时, 该水流阻力系数计算公式仅适用于正交淹没齿型丁坝情况。

从方程(8)可以看出, 当淹没度 $h/P > 1$ 时, 丁坝处于淹没状态, 随着 h 增大, 阻力系数 C_D 减小。Malavasi 等^[14]通过研究矩形桥面拖曳力系数发现, 当淹没度大于1时, 拖曳力系数随水深增加而减

小; 当淹没度小于1时, 拖曳力系数随水深增加而增大; 当淹没度接近1时, 拖曳力系数出现最大值。同时, 当坝长增加时, 拖曳力系数也随之增大。图3、4曲线中 P/h 与 L/B 也呈现上述趋势。

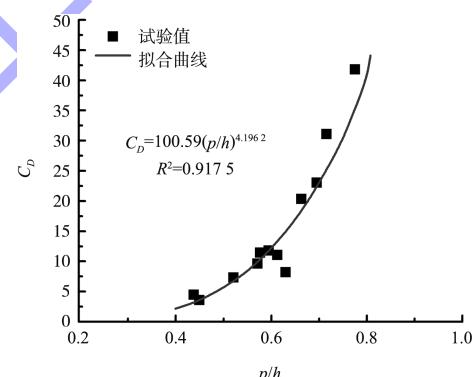


图3 相对堤高与拖曳力系数拟合曲线

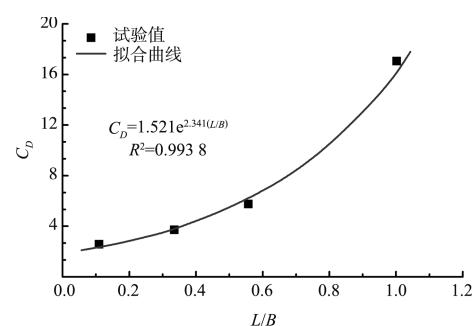


图4 相对坝长与拖曳力系数拟合曲线

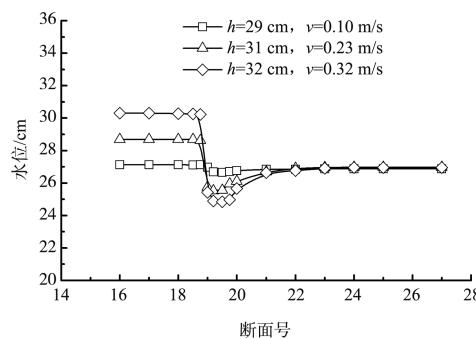
3.2 齿型丁坝壅水计算模型建立

由公式(8)与无量纲变量组可构成齿形坝身构件壅水预测模型。假定已知上游 h_1 、 v_1 及 C_D , 则可求解 Δh 的数值。通过对方程(5)变换可得求解

Δh 的方程:

$$\Delta h = h_1 \left(1 - \sqrt{1 - C_D A_r F r_1^2} \right) \quad (9)$$

为了评估该壅水计算预测模型对齿型丁坝壅水的预测效果,采用部分组次实测上下游水位壅水数据进行模型验证。上下游水力要素及水位变化曲线见图 5, 实测壅水值 Δh_1 、 Δh_2 、 Δh_3 分别为 0.204、1.263、2.185 cm。通过方程(9)计算可得预测壅水值 Δh_1 、 Δh_2 、 Δh_3 分别为 0.192、1.256、2.234 cm, 误差分别为 6.86%、0.24%、2.10%, 模型预测精度良好(图 6)。



注: 丁坝布置在 19 号断面, h 为进口水位, v 为进口流速。

图 5 坝身断面上下游水位变化

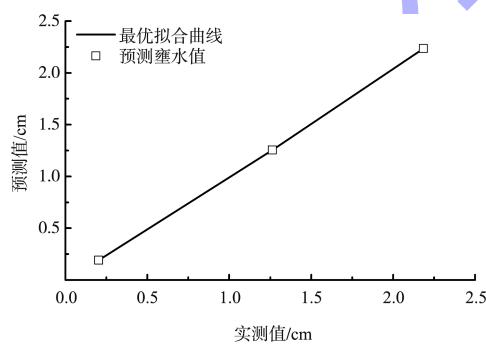


图 6 壅水模型相关分析

4 结论

1) 通过量纲分析得出影响淹没齿型丁坝阻力系数的主要无量纲参数,并结合物理试验成果建立了其阻力系数的理论计算公式,公式表明阻力系数主要与淹没度及相对坝长有关。淹没度越小,则阻力系数越大、相对坝长越长、阻力系数越大。

2) 通过动量守恒原理,引入淹没齿型丁坝阻力系数,建立了淹没齿型丁坝的壅水预测理论公式。

3) 通过实测资料对建立的壅水预测公式进行验证发现,其能够很好地预测丁坝引起的壅水,

该方法可对其他类型丁坝或涉水建筑物的壅水计算起到参考与借鉴的作用。

参考文献:

- [1] 李寿千, 丁晶晶, 陆永军, 等. 航道整治建筑物对河道行洪影响的试验研究[J]. 水运工程, 2010(6): 81-85.
- [2] AZINFAR H, KELLS J A. Backwater effect due to a single spur dike[J]. Canadian journal of civil engineering, 2007, 34(1): 107-115.
- [3] CRISS R E, SHOCK E L. Flood enhancement through flood control[J]. Geology, 2001, 29: 875-878.
- [4] 刘长波. 涉水工程对河道行洪及冲淤叠加影响的初步研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2010.
- [5] PINTER N, THOMAS R, WLOSINSKI J H. 2001. Assessing flood hazard on dynamic rivers[J]. EOS, Transactions of the American Geophysical Union, 2013, 82(31): 333-339.
- [6] 孔祥柏, 程年生. 丁、潜坝局部水头损失的试验研究[J]. 水利水运科学研究, 1992, (4): 387-395.
- [7] 应强, 孔祥柏. 淹没丁坝群壅水试验研究[J]. 水利水运科学研究, 1995(1): 13-21.
- [8] 应强. 淹没丁坝附近的水流流态[J]. 河海大学学报, 1995, 23(4): 62-68.
- [9] OAK A G, SMITH C D. Backwater effect due to overtopping a spur dike[C] //Proceedings of the Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering. Montréal: Canadian Society for Civil Engineering (CSCE), 1994: 136-145.
- [10] AZINFAR H, KELLS J A, ASCE M. Backwater prediction due to the blockage caused [J]. Journal of hydraulic engineering, 2008, 134(8): 1153-1157.
- [11] OAK A G. Backwater rise due to a submerged spur[D]. Saskatoon: Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, 1992.
- [12] KLAKA K, PENROSE J D, HORSLEY R R, et al. Hydrodynamic tests on a fixed plate in uniform flow[J]. Experimental thermal and fluid science, Elsevier, 2005, 30(22): 131-139.
- [13] AZINFAR H. Flow resistance and associated backwater effect due to spur dikes in open channels[D]. Saskatoon: Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, 2010.
- [14] MALAVASI S, GUADAGNINI A. Hydrodynamic loading on river bridges[J]. Journal of hydraulic engineering, 2003, 129(11): 854-861.