



勾头长度对非淹没丁坝周围水流特性的影响^{*}

胡旭跃^{1,2}, 杨陆鑫^{1,4}, 沈小雄^{1,2}, 陈健强³, 许足怀³, 钟佳昌¹

(1. 长沙理工大学水利学院, 湖南 长沙 410004; 2. 湖南省水沙科学与水灾害防治重点实验室, 湖南 长沙 410004;
3. 湖南省水运管理局, 湖南 长沙 410012; 4. 广西交通科学研究院, 南宁 530007)

摘要: 采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型, 数值模拟了丁坝周围水流的三维流动过程, 分析不同长度勾头对丁坝周围水流结构和流速场的影响。计算结果表明, 在勾头的影响下, 勾头段出现横轴漩涡, 远离坝头区域纵向流速减小, 大流速向坝头集中, 坝轴后方横流减弱, 上下游最大水位差减小, 影响效果随勾头长度的增加而增大。为深入探讨利用勾头改善丁坝周围通航水流条件奠定了基础。

关键词: 丁坝; 勾头; 水流特性; 数值模拟

中图分类号: U 617.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)10-0088-08

Effects of bend head length on flow characteristics around non-submerged spur dike

HU Xu-yue^{1,2}, YANG Lu-xin^{1,4}, SHEN Xiao-xiong^{1,2}, CHEN Jian-qiang³, XU Zu-huai³, ZHONG Jia-chang¹

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China;
2. Key Lab of Water-Sediment Flood and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410004, China;
3. Hunan Province Administration of Water Transportation, Changsha 410012, China;
4. Guangxi Transportation Research Institute, Nanning 530007, China)

Abstract: The RNG $k-\varepsilon$ turbulence model was used for numerical simulation of the three-dimensional flow process of water flows around the spur dike, so as to analyze the influence that different lengths of bend head have on the structure and velocity field of water flows around the spur dike. The computed results show that transverse vortex appears at the bend head section under the influence of the bend head; The longitudinal flow velocity decreases in the area away from the dike head; High flow velocity concentrates towards the dike head; Transverse flows weaken behind the dike axis; The maximum difference between upstream and downstream water levels reduces; And the effect of influence enhances as the length of bend head increases. These findings lay a foundation for investigation on improving the navigation flow condition around the spur dike by the bend head.

Keywords: spur dike; bend head; flow characteristics; numerical simulation

勾头丁坝由丁坝和勾头两部分组合而成, 通过组合使其同时具有丁坝束水冲沙和顺坝引导水流特性^[1]。陆永军等^[2]研究了丁坝回流区及恢复区近段流速分布。程昌华等^[3-4]研究了不同勾角和不同勾长组合对水位、坝头纵向流速、下游主回流区长度及坝头冲刷深度和范围的影响, 认为

丁坝在增加勾头后坝头纵向流速减小, 坝头流态得到改善。Kadota A 等^[5]研究了 T 型和 L 型丁坝在淹没和非淹没条件下剪切面、雷诺应力和涡量等分布情况的异同。Masjedi A 等^[6-7]研究了勾头丁坝在弯道水槽中, 丁坝参数和来流条件等因素变化对冲刷坑深度变化的影响, 试验结果表明冲刷

收稿日期: 2015-01-23

^{*}基金项目: 交通部科技课题项目 (2011 328 000 1570)

作者简介: 胡旭跃 (1962—) 男, 博士, 教授, 从事河流动力过程与航道工程技术研究。

深度随坝身长度和弗汝德数增大而增大, 长圆翼形则可在其他条件一定时减小冲刷深度。Abbasi S 等^[8]用数学模型计算了不同来流条件下不同长度的勾头丁坝在弯道不同位置上时丁坝周围的流速分布, 发现坝头流速随弗汝德数、坝长及勾头与来流的夹角增大而增大。Abdulmajid M 等^[9]使用 Flow-3D 模拟了在 180° 弯道中的不同位置上布置 5 座勾头丁坝时对弯道水流及冲刷的影响, 结果表明勾头丁坝群能有效减弱弯道水流的紊动及冲刷。

上述研究工作主要集中于坝后回流区和坝头冲刷, 而关于勾头对丁坝周围的水流结构及通航水流条件的影响研究相对较少。丁坝在加入勾头后, 周围水流特性的变化将引起通航水流条件的变化。鉴此, 本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型, 模拟丁坝周围水流的三维流动过程, 分析不同勾头长度对丁坝周围水流结构的影响, 为深入探讨利用勾头改善丁坝周围通航条件奠定基础。

1 控制方程

基本方程为不可压缩流体的连续方程和动量方程。

连续方程:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} - g \frac{\partial Z_b}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \quad (2)$$

式中: P 、 U_i 分别为流体点的平均压力和平均流速; Z_b 为河床高度。

Reynolds 应力 $-\overline{u_i u_j}$ 采用紊动黏性概念表征:

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

式中: k 为紊动动能; ε 为紊动耗散率; C_μ 为无量纲常数。RNG $k-\varepsilon$ 模型考虑大尺度运动和修正后的黏度项体现小尺度的影响, 所得到的 k 和 ε 控制方程表示为:

$$U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + Prod - \varepsilon \quad (5)$$

$$U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} Prod - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \quad (6)$$

$$Prod = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

模型参数的确定与选取: $C_\mu = 0.085$; $C_{\varepsilon 1} =$

$$1.42 - \frac{\eta(1 - \eta/4.38)}{1 + 0.015\eta^3}; C_{\varepsilon 2} = 1.68; \sigma_k = \sigma_\varepsilon =$$

$$0.7179; \eta = \frac{Sk}{\varepsilon}, S = (2S_{ij}S_{ji})^{1/2}, S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)。$$

2 数值模型建立及验证

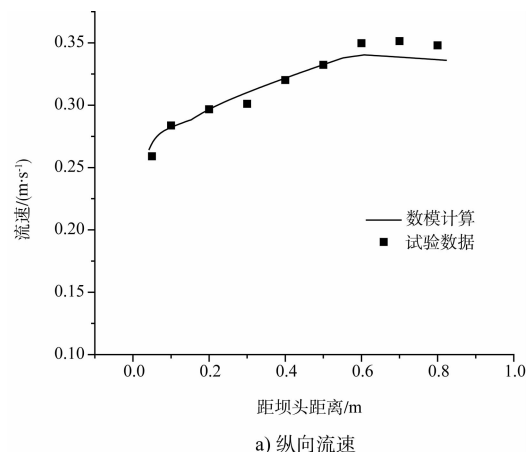
2.1 模型建立

验证模型采用文献 [12] 中的试验模型, 水槽长 28 m、宽 1.5 m、高 0.35 m, 丁坝长 20 cm、高 25 cm、宽 2 cm, 与水流流向垂直于右边壁正交布置。水流垂直于入口边界, 由左向右, 均匀来流, 控制水深 20 cm、流速 0.25 m/s。

计算网格采用六面体均匀网格。入口采用速度入口边界条件, 出口采用自由出流边界条件, 水槽两侧及底部设为壁面边界。丁坝表面为无滑移边界条件, 即速度相对无滑移、无穿透。

2.2 模型验证

利用文献 [12] 物理试验数据验证数学模型, 所选择验证位置为丁坝轴线所在断面相对水深 0.75h (h 为控制水深) 处, 起始测点距丁坝坝头 4 cm, 结束测点距坝头 80 cm。采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型计算坝轴断面流速分布, 由图 1 可见, 数值计算与试验数据吻合较好, 所以此数学模型可较好地预测丁坝附近流域水流流速。



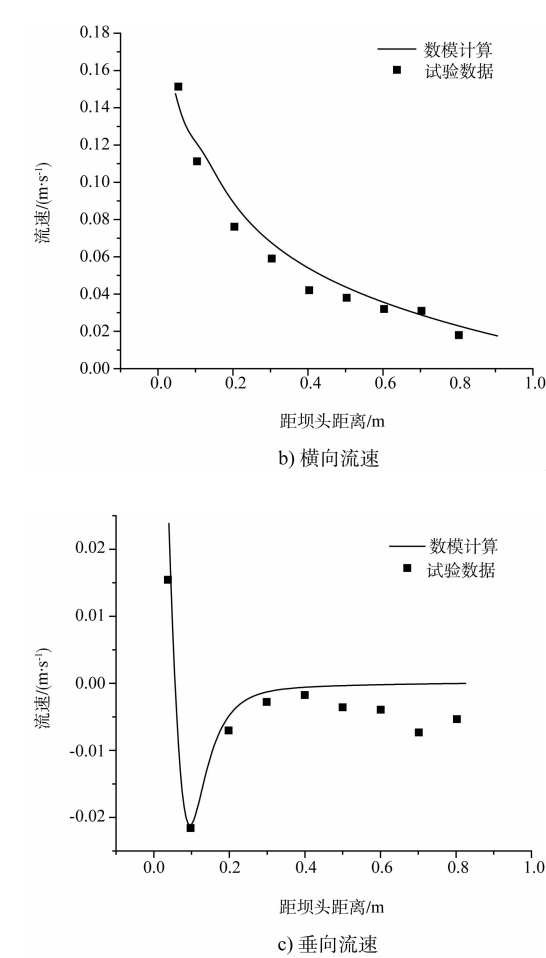


图1 时均流速验证

3 数学模型计算及结果分析

3.1 计算条件及设计工况

模拟对象为水槽概化模型。水槽宽 2 m、长 20 m，丁坝布置于水槽中段右边壁。如表 1 所示，为研究不同长度的丁坝勾头段对周围水流的影响，无勾头丁坝设为正挑直线丁坝，丁坝长度 D 取 60 cm，即压缩比取为 0.3。勾长比 L/D 分别取 0.2、0.4 和 0.6，勾头段设置于丁坝坝头，勾角 90° 。丁坝坝身及勾头段宽度取 3 cm，丁坝高度为 30 cm，见图 2。计算水流条件为控制水深取 25 cm，来流速度为 0.2 m/s。

表 1 设计工况

工况	坝身 长度/cm	勾头 长度/cm	勾角/ ($^\circ$)	控制 水深/cm	来流速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	60	0	90	25	0.2
2	60	12	90	25	0.2
3	60	24	90	25	0.2
4	60	36	90	25	0.2

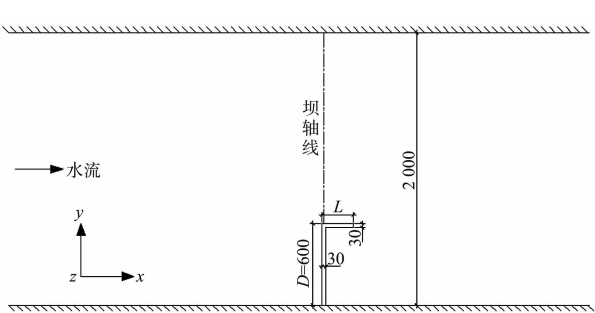
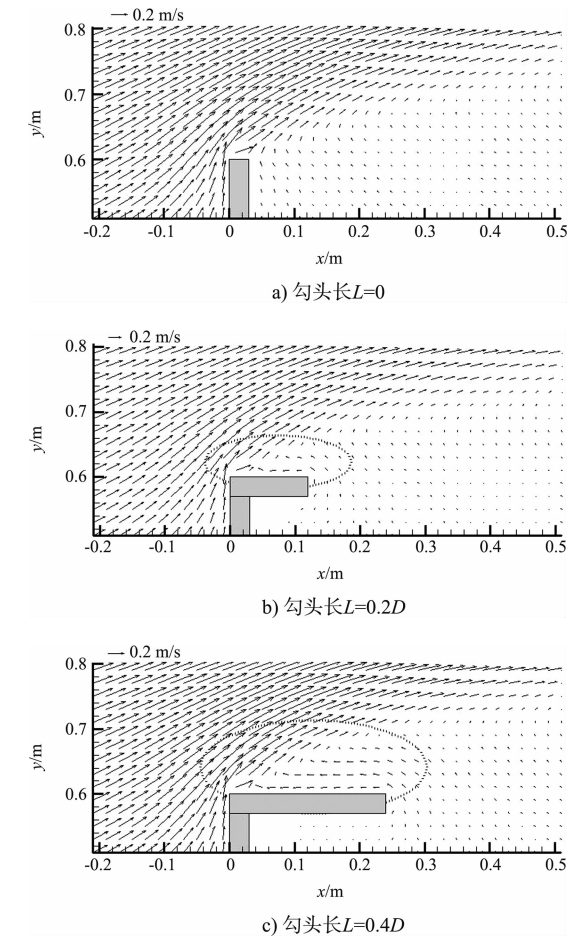


图2 丁坝水槽（单位：mm）

3.2 坝头水流结构分析

图 3 为非淹没状态下不同勾头长度的丁坝坝头附近的流场。丁坝在加入勾头后，坝后主回流区的部分水流进入勾头段，在勾头段形成一小回流区。原因是水流在丁坝坝头发生边界分离，勾头段部分水流在主流的带动下向下游运动，为了填补留下来的空隙，坝后主回流区的水体流进补充。对比可知，勾头段回流区纵向长度比勾长略大，横向宽度则随勾头长度的增加呈增长趋势，这是因为勾头长度增加促使回流强度加大、回流区域范围也随之增大。



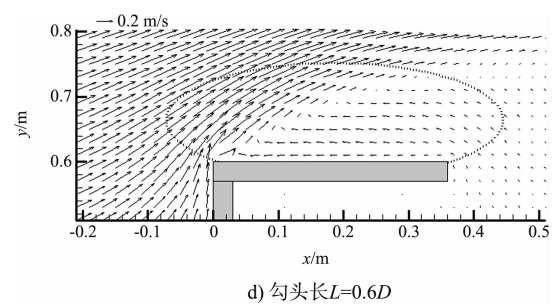


图 3 $z=0.23\text{ m}$ 非淹没状态下不同勾长丁坝坝头流场

图 4 是各工况在非淹没状态下坝头附近纵断面 $y=0.65\text{ m}$ 的流场。勾头长度 $L=0.2D$ 时的流场与无勾头情况差别并不明显; 但当 L 达到 $0.4D$ 时, 流场中可明显看到有一横轴漩涡形成; 当 L 达到 $0.6D$ 时这一现象更加显著。原因是坝后填补进勾头回流区的水流与坝头前方的水流在勾头段相遇, 部分水流折向水底又进入回流中, 继而形成横轴漩涡, 随着勾头的增长, 勾头段回流强度加大, 横轴漩涡随之增大。

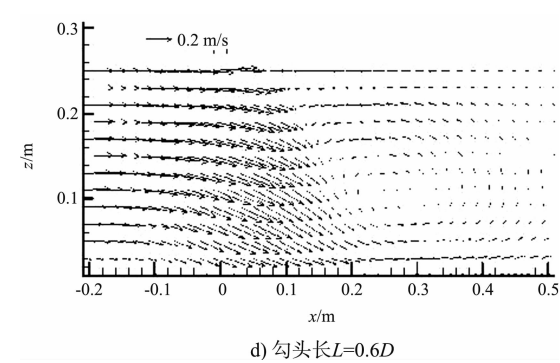
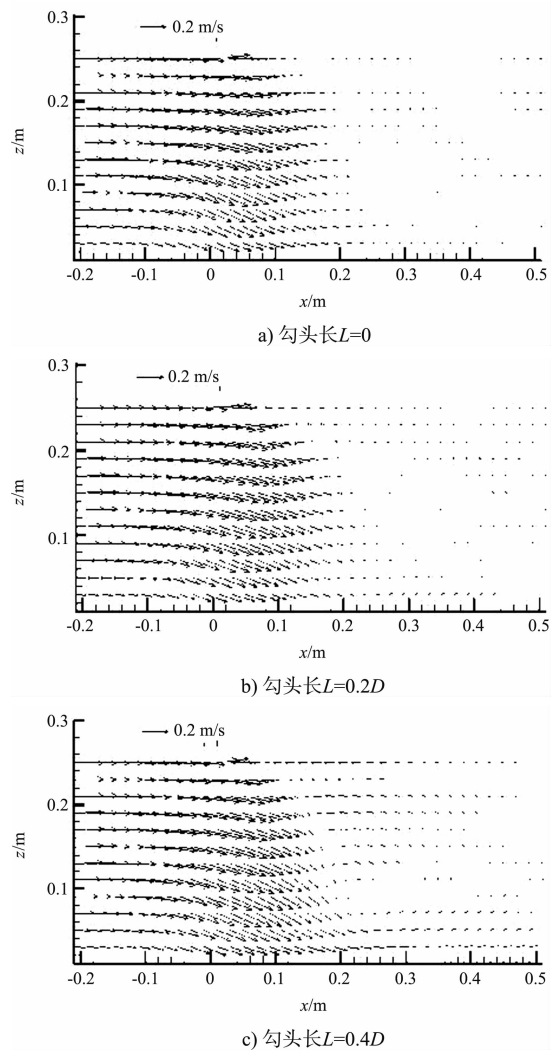
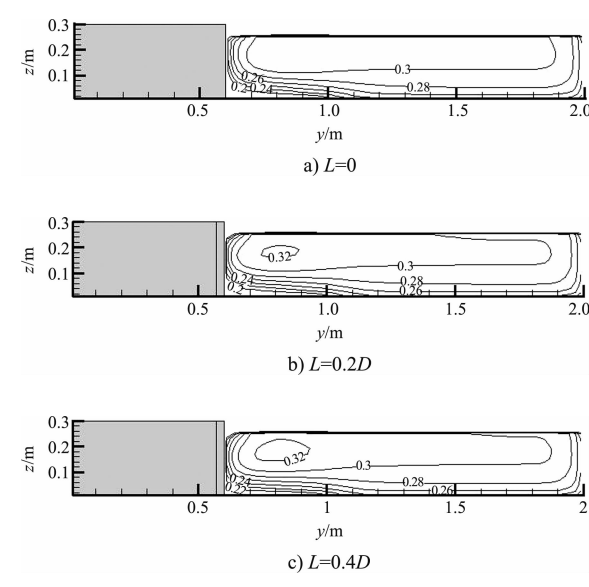


图 4 $y=0.65\text{ m}$ 非淹没状态下不同勾长丁坝坝头纵断面流场

3.3 流速场分析

图 5 为各工况坝轴断面纵向流速分布对比。整体来看, 4 种工况都表现出纵向流速由水面向水底减小的趋势, 在绕流作用下其在坝头位置流速梯度均较大。但是无勾头丁坝的纵向流速在横断面方向上的分布更加均匀, 勾头丁坝则出现大流速向坝头集中的现象。一方面是由于勾头减小了水流因惯性作用断面收缩的程度, 使坝轴断面流量分配发生变化; 另一方面则是由于勾头段横轴漩涡的存在阻碍了水流绕流, 使水流集中从坝头的一部分区域通过, 使这一区域流速增大。非淹没状态下, 勾头段横轴漩涡占据了近坝头水域, 大流速区出现在距坝头稍远的地方, 该区域面积随勾头长度的增加而增大。大流速值向坝头集中会增大坝头区域的切应力, 对丁坝安全提出了更高的要求, 但远离坝头区域流速的减小为船舶的安全通航提供了更有利的条件。



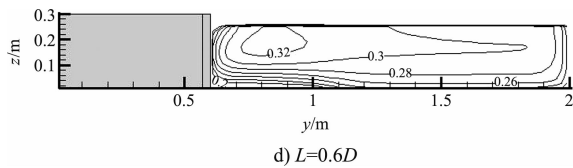


图 5 $x = 0.015$ m 坝轴断面纵向流速分布对比 (单位: m/s)

图 6 为非淹没状态下不同勾长丁坝纵向流速及变化率对比。纵向流速分布曲线显示了纵向流速沿程变化情况,变化率则是指一个测点的纵向流速相对其前一测点流速的变化值占前一测点流速大小百分比。如图 6 所示,水槽在放置丁坝后,过水断面被人为缩窄,在流量一定的情况下,水流在流经丁坝时纵向速度会快速增大且越靠近坝头速度变化越快。由图 6a) 可看到,在距离坝头较近的位置 ($y = 1.0$ m, 距坝头 0.4 m), 坝后 2 倍坝长内有勾头丁坝的纵向流速较无勾头丁坝要小, 2 倍坝长后无勾头丁坝的纵向流速因受回流区及水流扩散的影响呈快速减小的趋势, 而勾头丁坝则为水流提供了相对稳定的边界, 使水流保持了沿勾头方向的较大惯性, 坝后水流的流速变化与无勾头工况相比更加平稳。在距离坝头较远的位

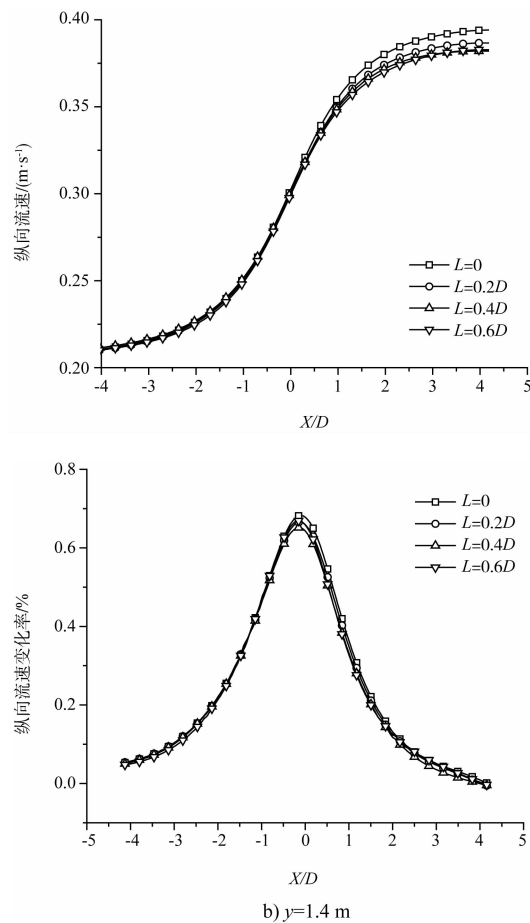
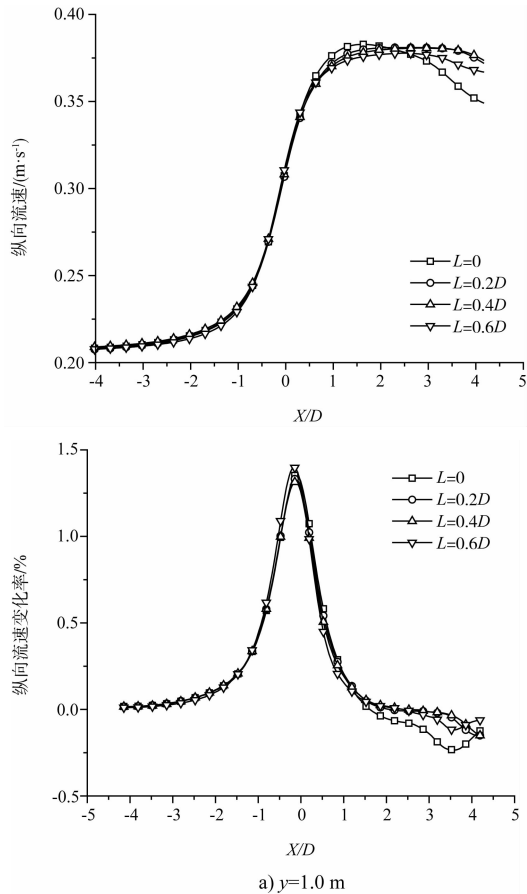


图 6 $z = 0.23$ m 非淹没状态下不同勾长丁坝纵向流速对比

置 ($y = 1.4$ m, 距坝头 0.8 m), 水流的纵向流速在丁坝增加勾头后得到减小, 其减小程度随勾头长度的增加而增大, 但流速变化率基本不受影响。这是由于勾头减小了绕流因惯性作用断面收缩的程度, 水流不过度集中于无丁坝一侧, 使其纵向流速减小。

因为丁坝的侧向阻碍作用, 水流需绕过丁坝进入下游, 在此过程中水流产生了较大的横向流速。图 7 为非淹没状态下距坝头不同距离不同勾长横向流速及变化率纵向沿程对比。整体来看, 各工况横向流速均先从坝前沿程增大至坝轴附近达到其极值, 随后以相对坝前较快的速率减小。当 $y = 1.0$ m 时, 丁坝在增加勾头后, 坝后同一位置的横向流速减小, 横向流速的衰减速率增大, 效果随勾头长度的增加而增强。当 $y = 1.4$ m 时, 在 $L \leq 0.4D$ 的情况下, 3 种工况横向流速及变化率沿程几乎无差别。当增加勾头长度至 $0.6D$ 时, 坝后横向流速减小, 衰减速率加快。可见, 增加勾头长度可以扩大勾头的影响范围。

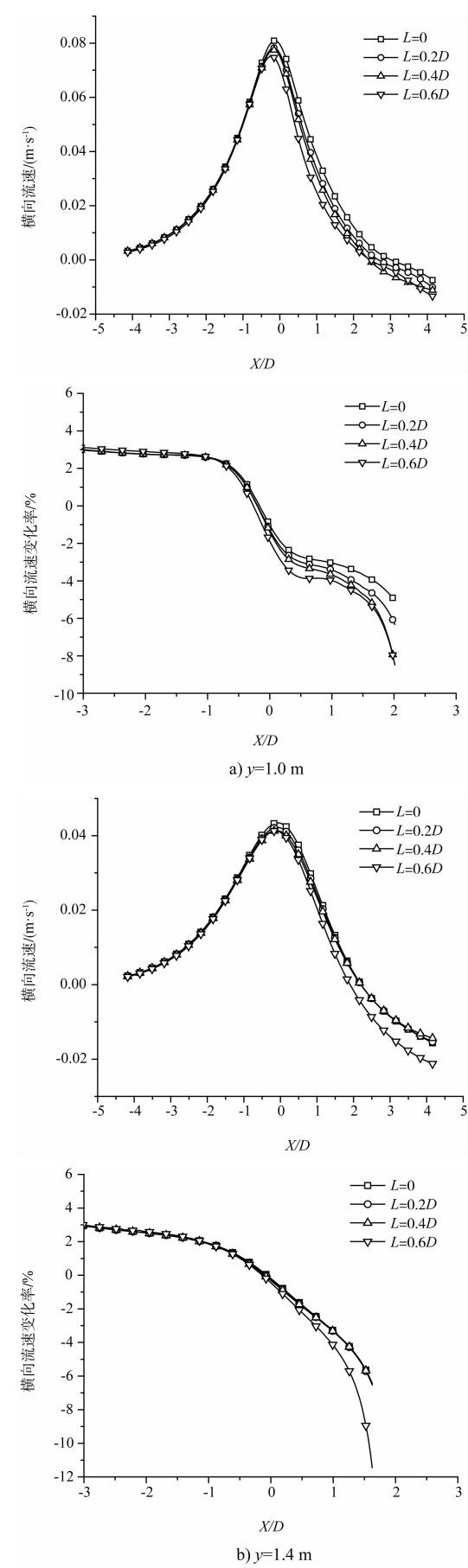
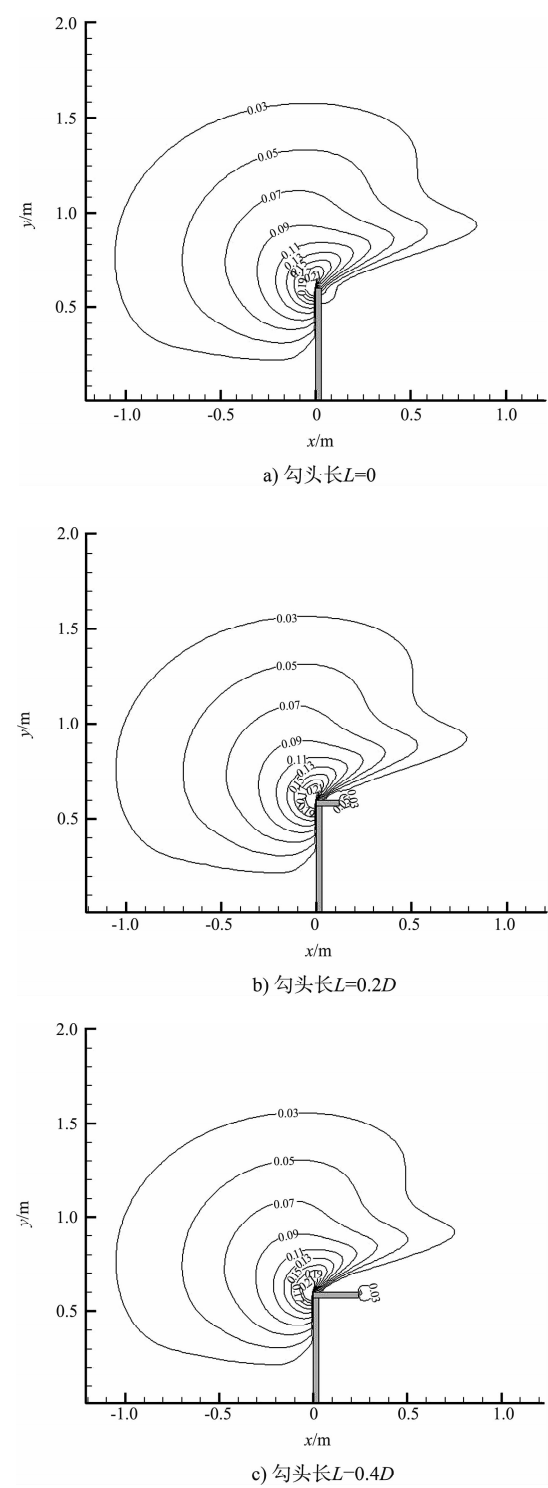


图7 $z = 0.23$ m 非淹没状态下不同勾长丁坝横向流速对比

图 8 为非淹没状态下勾头长度不同时坝头周围横向流速分布情况。总体来看, 丁坝周围横向流速等值线呈扇形分布, 坝头上游附近横向流速等值线较密, 且越靠近坝头其值越大。丁坝在增加勾头后, 对其坝轴前方水域的横向流速分布情况影响不大, 其影响主要集中在坝轴后方区域。4 种工况坝轴后方横向流速超过 0.03 m/s 的区域



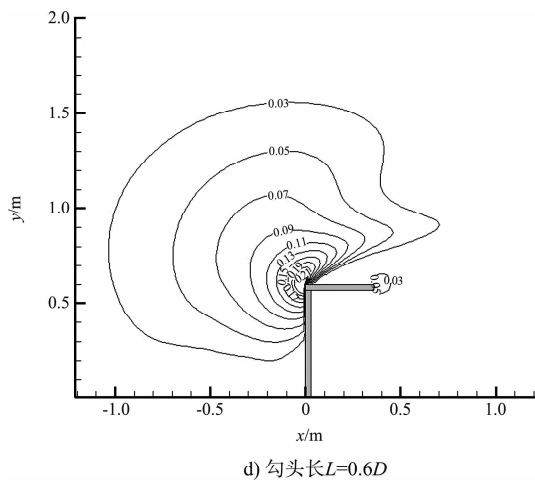


图 8 $z=0.23$ m 非淹没状态下不同勾长丁坝坝头
横向流速分布 (单位: m/s)

面积分别为 0.486 、 0.460 、 0.419 、 0.359 m^2 ，增加勾头后这一面积相对无勾头丁坝分别减小了 5.3% 、 13.7% 和 26.1% 。可见，勾头起到导顺坝后水流、减小坝后横向流速的作用，这一作用效果随勾头长度的增加而增大。

图 9 是各工况坝头垂向流速分布对比。各工况坝头垂向流速分布的规律整体相似，丁坝坝身前方水流因受丁坝阻挡而下潜产生指向水底的负向垂向流速，且越靠近坝身垂向流速越大；坝头则是因为存在涡旋，水流向下运动，产生了垂向流速为负的区域，距坝头越近垂向流速及流速梯度越大，且这一区域的面积随着勾头长度的增加而增大。此外，在非淹没状态下，丁坝增加勾头后，坝头勾头段会因横轴漩涡的产生出现一垂向流速向上的区域，其纵向范围会随着勾头长度的增加而向下游扩展。

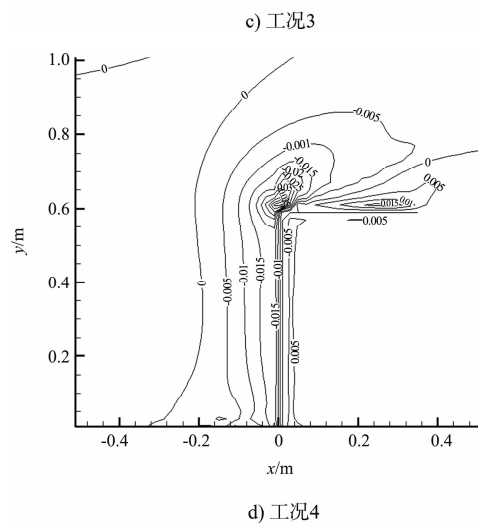
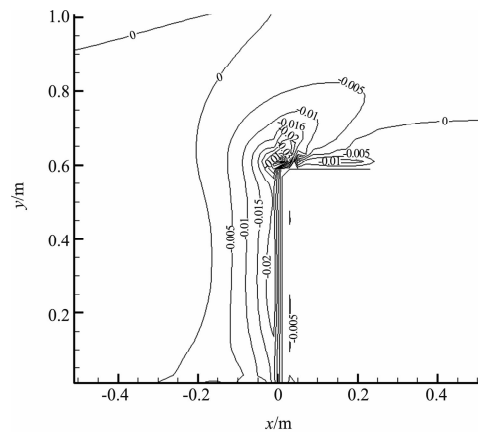
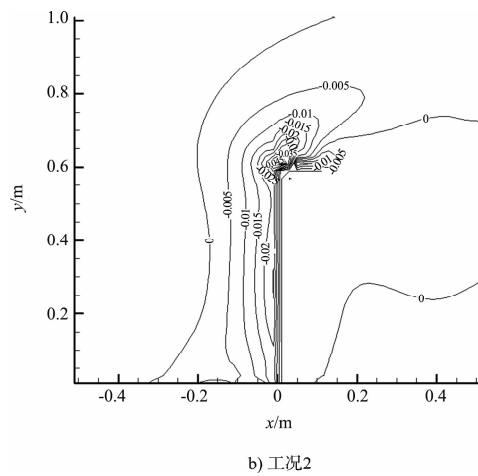
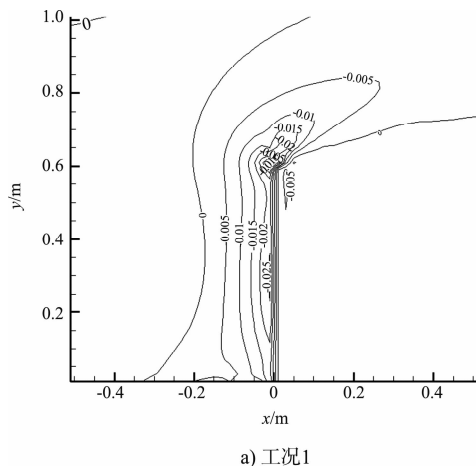


图 9 $z=0.23$ m 坝头垂向流速分布对比 (单位: m/s)

3.4 沿程水位变化分析

图 10 为丁坝在加入不同长度勾头后水位沿程变化对比。整体来看，丁坝在增加勾头后，上下游水位均有升高，且升高值随勾头长度增加而增大。原因是丁坝在加入勾头后，增加了压缩段长度，水流所受阻力增大，水位壅高。勾头的存在阻碍了水流的扩散，并使水流保持沿主流方向上较大的惯性，在一定程度

上延缓了水流扩散速度,使图示范围内上下游最大水位差减小,减小效果随勾头长度的增大而增大(表 2)。

表 2 不同工况最大水位差

y/m	L=0 水位差/m	L=0.2D 水位差/m	与 L=0 相比减小量/%	L=0.4D 时水位差/m	与 L=0 相比减小量/%	L=0.6D 时水位差/m	与 L=0 相比减小量/%
1.0	0.005 734	0.005 442	5.1	0.005 316	7.3	0.005 246	8.5
1.4	0.005 576	0.005 296	5.0	0.005 186	7.0	0.005 144	7.7

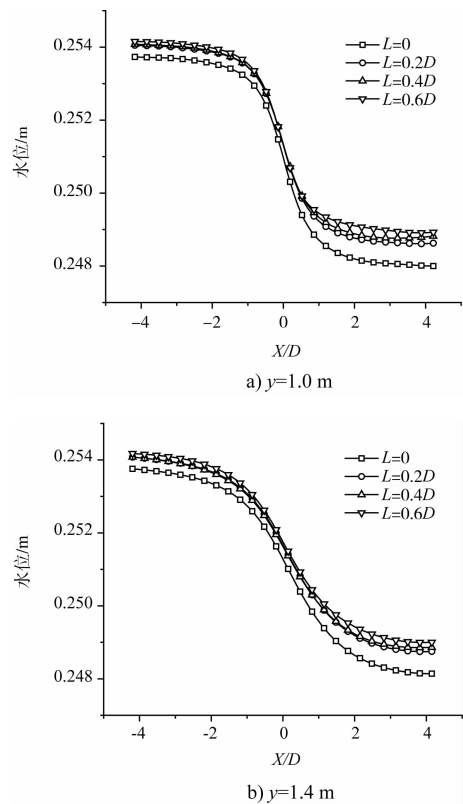


图 10 不同勾长时水位沿程变化对比

4 结语

- 1) 丁坝在增加勾头后,坝头水流结构发生改变,勾头段出现横轴漩涡,漩涡尺度随勾头长度的增加而增大。
- 2) 勾头具有调整丁坝周围纵向流速分布的作用,远离坝头区域纵向流速减小但沿程速度变化率基本不受影响,近坝头区域则因横轴漩涡对水流的阻碍作用出现局部流速增大现象。勾头对丁坝附近纵向流速分布的调整作用随勾长的增加而增大。
- 3) 勾头能有效减小坝轴后方水域横流,平顺坝后水流,效果随勾长增加而增强。
- 4) 勾头的增加使勾头横轴漩涡增大,继而增大了坝头附近水流的垂向流速,而大垂向流速范围也相应有所增大。
- 5) 丁坝增加勾头后,丁坝周围的水位上升,

上下游最大水位差随勾头长度的增加而减小。

参考文献:

[1] 胡旭跃. 航道整治[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.

[2] 陆永军, 周耀庭. 勾头丁坝下游流场初探[J]. 水道港口, 1989(1): 8-21.

[3] 程昌华, 刘建新, 许光祥. 勾头丁坝对水流结构影响的实验研究[J]. 重庆交通学院学报, 1994, 13(1): 58-69.

[4] 程昌华, 刘建新. 丁坝勾长比对坝头冲淤特性的影响[J]. 重庆交通学院学报, 1994, 13(3): 75-82.

[5] Kadota A, Suzuki K, Kojima E. Flow visualization of mean and coherent flow structures around T-type and L-type groynes[J]. River Flow, 2010: 204-210.

[6] Alireza Masjedi, Abdolmajid Nadri, Amir Taeedi, et al. Control of local scour at single L-shape spur dike with wing shape in flume bend[J]. Journal of American Science, 2010, 6(10): 894-897.

[7] Alireza Masjedi, Issa Akbari, Hamid Abyar. Evaluating scour at L-shape spur dike in a 180 degree bend[J]. World Applied Sciences Journal, 2011, 15(12): 1 740-1 745.

[8] Abbasi S, Kamanbedast A, Ahadian J. Numerical investigation of angle and geometric of L-shape groin on the flow and erosion regime at river bends [J]. World Applied Sciences Journal, 2011, 15(2): 279-284.

[9] Abdolmajid Matinfard (Kabi), Mohammad Heidarnejad, Javad Ahadian. Effect of changes in the hydraulic conditions on the velocity distribution around a L-shaped spur dike at the river bend using flow-3D model[J]. Technical Journal of Engineering and Applied Sciences, 2013, 3(16): 1 862-1 868.

[10] Speziale C G, Thangma S. Analysis of an RNG Based Turbulence Model for Separated Flows[R]. USA: NASA, CR-189600, ICASE Rept. NO. 92-3, 1992.

[11] 彭静, 河源能久, 玉井信行. 线性与非线性紊流模型及其在丁坝绕流中的应用[J]. 水动力学研究与进展, 2003, A18(5): 589-594.

[12] 王慧, 胡旭跃, 马利军, 等. 丁坝头部附近速度分布特征及对通航影响距离的实验研究[J]. 安全与环境学报, 2010, 10(5): 167-172. (本文编辑 武亚庆)