



基于船舶受力试验的丁坝区 通航安全问题研究*

李 佳¹, 沈小雄^{1,2}, 胡旭跃^{1,2}, 陈家贵¹, 刘 双¹, 杨陆鑫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)

摘要: 利用三维点式多普勒流速仪(ADV)对丁坝区流场进行量测, 并通过高精度测力天平和数字式应变数据采集仪测量船模在不同流速下丁坝区域不同位置处的纵向和横向二维受力状况, 分析船舶在丁坝区域航行时的受力特性, 从受力角度研究船舶在整治建筑物附近的通航安全问题。试验研究表明, 船舶在经过丁坝时横向受力会经历一次正向(推力)峰值和一次负向(吸力)峰值, 正向(推力)峰值出现的位置为船体中心移动至丁坝上游0.56~0.67倍船长范围, 负向(吸力)峰值出现的位置为船体中心位于丁坝下游0.11~0.44倍船长范围, 且船体横向距坝头越远, 极值出现得越晚。纵向受力极值出现位置为船舶中心位于丁坝下游0.065~0.28倍船长范围, 且随着来流流速增大, 极值点有向下游推移的趋势。

关键词: 丁坝; 通航安全距离; 水流特性; 船舶受力

中图分类号: U 617.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)05-0070-06

Navigation safety in spur dike area based on ship force experiment

LI Jia¹, SHEN Xiao-xiong^{1,2}, HU Xu-yue^{1,2}, CHEN Jia-gui¹, LIU Shuang¹, YANG Lu-xin¹

(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)

Abstract: A three-dimensional point-type Doppler velocimeter(ADV) is used to measure the flow field in the spur dike area, and a high-precision force balance and a digital strain data acquisition instrument are used to measure the longitudinal and transverse two-dimensional force conditions of the ship model at different positions in the spur dike area under different flow velocities. On this basis, the force characteristic of the ship navigating in the spur dike area is analyzed, and the navigation safety of the ship near regulating structures is investigated from the force perspective. The experimental results show that when the ship passes by the spur dike, the transverse force will have a forward(thrust) peak and a reverse(suction) peak. The forward(thrust) peak appears at the position where the ship center is moved upstream of the spur dike in the range which is 0.56~0.67 time of the ship length; the reverse(suction) peak appears at the position where the ship center is located downstream of the spur dike in the range which is 0.11~0.44 time of the ship length; the longer the transverse distance between the ship and the dike head is, the later the extreme value will appear. The extreme value of longitudinal force appears at the position where the ship center is located downstream of the spur dike in the range which is 0.065~0.28 time of the ship length; as the approaching flow velocity increases, the extreme point tends to evolve downstream.

Keywords: spur dike; safe navigation distance; flow characteristics; stress on ship

收稿日期: 2015-12-22

*基金项目: 交通部科技课题项目(20113280001570)

作者简介: 李佳(1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为波浪水流与边界的相互作用。

丁坝作为整治建筑物被广泛应用于航道整治和防洪治河工程中^[1]。国内外学者已对其进行了系列研究。Ahmed^[2]进行了关于丁坝近体水流流动的试验,该试验记录了丁坝周围水位的变化情况;Garde等^[3-4]实验研究了水流在绕过丁坝时产生的流线缩窄现象对丁坝下游回流区的影响,并分析了丁坝对水流的扰动;Jennifer^[5]通过分析丁坝附近流速、雷诺应力的分布及冲刷深度,研究了丁坝对混合沙床面冲刷的影响。国内学者窦国仁等^[6]通过3个不同宽度水槽的观测,获得了有关回流区长度及宽度的资料,并总结出矩形水槽回流区长度的公式;许光祥等^[7]通过试验研究对丁坝挑角对水位壅高、坝田淤积、冲刷范围等做了探讨;张柏山等^[8]运用可视化技术,试验研究了丁坝周围的流态,发现在丁坝上游会出现马蹄涡,在坝头会出现卡门涡,且丁坝与侧板的交角越大,两种漩涡越强;周宜林等^[9]通过建立大涡模型对三种挑角的丁坝附近水流进行模拟计算,发现上挑丁坝周围水流流态变化最大,下挑丁坝对坝头防护较好;陈稚聪等^[10]采用3D-PDA技术在玻璃水槽中对丁坝回流区进行研究,首次根据流速的正负在横向和纵向上将回流区重新分区,在此基础上对回流长度、宽度和回流流量的变化规律做出了更进一步的研究。

值得注意的是,以往关于丁坝的研究多注重于坝后回流区及坝头冲刷等方面,在对通航条件影响方面较多考虑丁坝周围水流特性^[11-13],而少有从船舶受力方面研究通航条件的。为了更好地掌握丁坝附近水流条件对船舶通航的影响,本文开展了船舶在丁坝区受力实验研究:首先利用三维点式多普勒流速仪(ADV)对不同流速下丁坝区流速场进行定量的量测,分析丁坝周围水流特性;其次通过高精度测力天平 and 数字式应变数据采集仪,测量船体在丁坝附近不同位置纵向和横向二维受力状况,进而确定船舶在丁坝附近航行时的通航状况。

1 试验装置及组次安排

1.1 试验装置

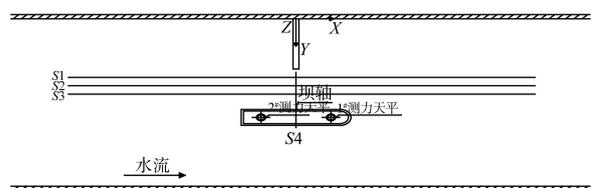
为了研究船舶在丁坝区的受力特性,本次试

验水槽的长宽高分别为50、2.0和0.80 m,坡度为1.0‰,丁坝长宽高分别为 $D=60$ cm, $B=5$ cm和 $H=30$ cm。坐标原点取槽底坝轴线与左侧水槽壁交点处, x 方向为水流方向, y 方向为坝轴线, z 方向垂直水槽向上。根据《内河通航标准》^[14],选取天然和渠化河流航道2 000吨级货船作为代表船型,物理模型船体按内河航道中实际船型设计,船模及丁坝几何比尺为 $\lambda_L=1:100$,船模尺寸为:船长 $L_S=90$ cm、船宽 $B_S=15$ cm、船体吃水 $T_S=2.6$ cm,船模固定在可以沿水槽移动的轨道车上。根据重力相似准则,水流速度比尺 $\lambda_v=1:10$,船舶受力的力值比尺 $\lambda_F=1:10^6$ 。

水槽试验区域的时均流速采用挪威 Nortek 公司的 Vectrino 三维点式多普勒流速仪(ADV)测量,船舶应力测量采用扬州科动电子有限公司所生产三分量测力天平 KD432000,应变采集仪为北京波普公司生产的数字式应变数据采集仪 WS-3811N。测力天平的布置如图1所示,1#、2#测力天平的中心位于船舶中轴线上,1#测力天平布置在船首,2#测力天平布置在船尾,各测力天平中心距船舶中心为30 cm。为保证试验区域水流条件的均匀性,所有试验均在水槽中部进行。

1.2 试验组次安排

试验流速选取0.1、0.15、0.2、0.25和0.3 m/s五级流速,水深取为15 cm。测线布置见图1,纵向线S1、S2和S3分别距坝头 $1/6D$ (10 cm)、 $1/3D$ (20 cm)和 $1/2D$ (30 cm),船模从丁坝上游 $2.17L_S$ 处开始向下游运动,至丁坝下游 $2.28L_S$ 处结束。横向线S4起始测点距坝头4 cm,最后一个测点距坝头70 cm。考虑到试验组次较多,对各个组次的测点进行了优化布置,坝头及坝轴线位置做了加密处理。



a) 测线布置

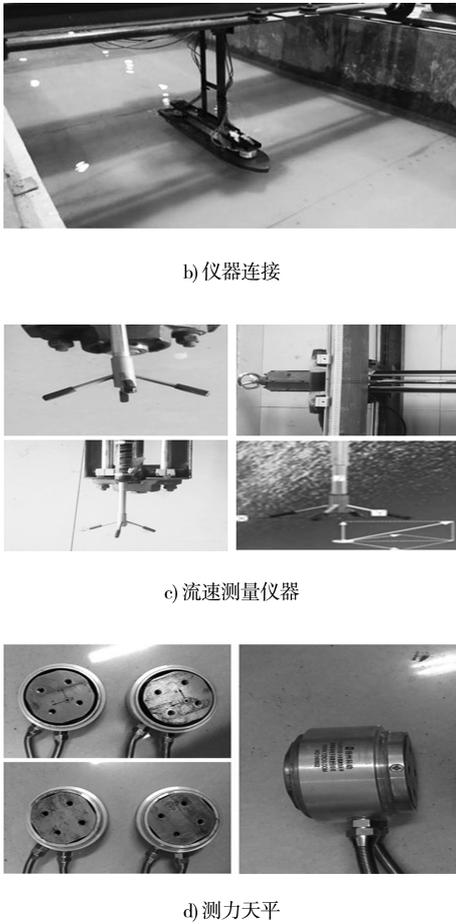


图1 实验装置及测线布置

2 试验结果分析与讨论

2.1 坝区流场

2.1.1 横向流速

丁坝的建造束窄了河道，改变了水流边界条件。由于丁坝的侧向阻碍作用，水流在绕过丁坝的过程中会产生较大的横向流速，ADV 探头量测位置为水面下 5 cm 处。图 2、3 为流速 0.2 m/s 时各断面横向流速。横向流速方向为沿着坝轴线方向，纵向流速方向沿水流方向。由图知，当水流到达丁坝位置时，由于河面束窄，流速及流速梯度迅速增大，横向流速峰值出现在坝轴线区域，且越靠近丁坝横向流速迅速增大，在距离坝头 10~20 cm 处有最大值。

2.1.2 纵向流速

丁坝附近水流特性呈复杂的三维水流运动。图 4、5 为流速 0.2 m/s 时各断面纵向流速。由图知纵向流速在丁坝上游 1 倍坝长前即 0.66 倍船长

前变化较小，随着距离坝头距离的减小纵向流速快速增大，且越靠近坝头速度变化越快紊动强度越大。

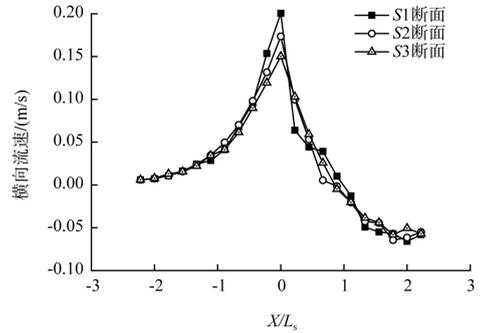


图2 S1、S2、S3 断面横向流速

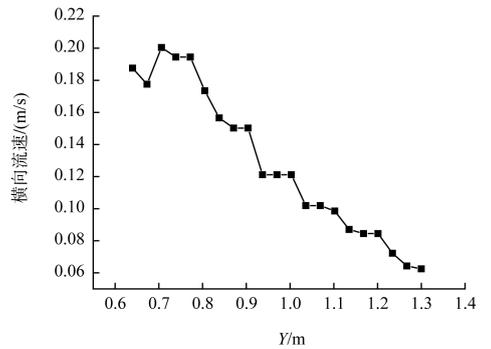


图3 S4 断面横向流速

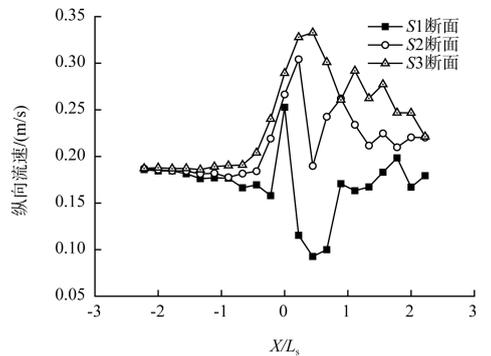


图4 S1、S2、S3 断面纵向流速

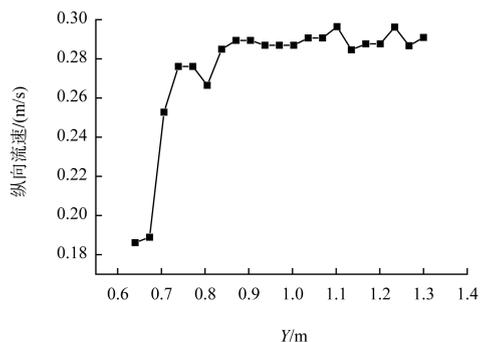


图5 S4 断面纵向流速

2.2 船舶受力及通航安全距离

2.2.1 船舶横向受力

丁坝附近的水流运动存在着横流、漩涡、回流等多种流态,多种水动力因素影响船舶受力状态。船模所受横向力的正负规定为,使船舶向远离丁坝方向运动的力为正向力(推力),反之为负向力(吸力)。

从船舶下行沿纵向线 S2 通过丁坝附近的受力情况可知,船舶在不同流速作用下所受横向力的变化呈现出相似的规律,横向力沿程出现一个波峰,一个波谷,且各峰值出现的位置因流速不同而产生差异(图 6)。当船舶沿纵向线 S2 下行通过丁坝附近时,受坝前横流顶推作用的影响,越接近丁坝,船舶所受到的横向力越大,越靠近坝头横向力增速越快,这与 ADV 量测的横向流速分布规律一致(图 2、3)。船舶所受横向力的正向(推力)极值,出现在 $X/L_s = 0.56 \sim 0.67$ 的范围。随后横向力迅速减小,坝轴是船舶所受横向力发生正负转变的位置,当船舶中心位于坝轴附近时,横向力由推力转变为吸力。这是因为水流在丁坝坝头发生边界分离,产生大量漩涡,坝头水位下降,船体靠近坝头侧水位低于另一侧水位,漩涡产生的负压和船体两侧水位差共同作用下,船体将受到负横向力作用。过丁坝轴线后,船体所受吸力迅速增大,在 $X/L_s = 0.11 \sim 0.44$ 达到吸力峰值。随后,涡流负压及船舶两侧水位差减小,船舶受绕流及丁坝回流顶推的作用显现,吸力迅速减小。

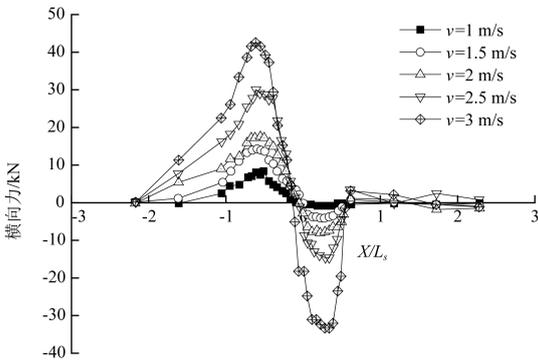


图 6 S2 断面船舶横向受力沿程变化

来流速度的变化,并没有影响船体横向受力变化趋势,但不同流速下极值大小产生明显变化。来流速度越大所受到的横向力越大且横向力的变

化率也越快,且负向(吸力)极值在这一方面表现得更为明显。

3 个纵向断面上横向力变化规律基本一致。但是船舶所受横向力的大小、变化速率、极值出现的位置和极值的大小随着船舶与丁坝距离的不同表现出差异(图 7)。与坝头距离越近,船舶受到的横向力越大,且变化速率越大。值得注意的是,由于 S1 断面更加靠近坝头,表现出在丁坝上游,横向力变化较其他两个断面变化要缓慢。出现这一现象的原因是,船舶在向丁坝靠近时,周围横流会逐渐增大,但由于船舶在 S1 纵向线上时距丁坝坝头及水槽岸壁较近,船舶与丁坝间形成的过流空间过于狭窄产生岸壁效应,岸壁效应随着船舶靠近丁坝而增强,在横流顶推力和岸壁效应吸附力两者综合作用下船舶所受横向力在开始时呈现出变化缓慢的现象。

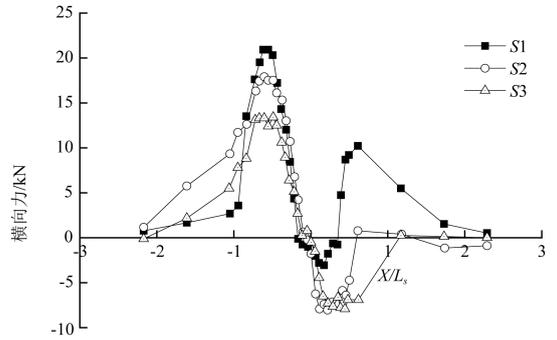


图 7 不同断面船舶横向受力沿程变化 ($v = 2 \text{ m/s}$)

不同来流速度下,丁坝坝轴线上船舶受力变化规律基本一致。由于横流影响船舶在靠近坝头处推力,随着与坝头距离增加,船体靠近坝头侧受到强紊动涡流影响,船舶受力在距离坝头 5.7~13 cm 即 $Y = 0.657 \sim 0.73 \text{ m}$ 处由推力转为吸力,后在距离坝头 20~30 cm 即 $Y = 0.8 \sim 0.9 \text{ m}$ 处转为推力,30~40 cm 即 $Y = 0.9 \sim 1.0 \text{ m}$ 后推力迅速减小趋于 0 (图 8)。

由横向流速分布和船舶受力情况分析可知,船头由上游即将经过坝轴到船尾完全离开坝轴这一区间内,横向流速变化将越快,船舶所受横向力大、变化速率快且推力和吸力转换,这对船舶操纵及安全航行带来极其不利的影

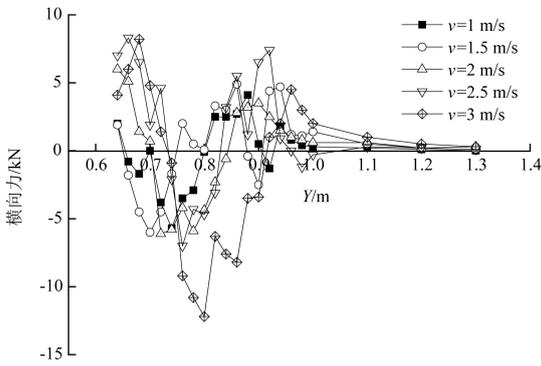


图8 丁坝轴线船舶横向受力沿程变化

2.2.2 船舶纵向受力

船舶所受的纵向力来自两部分：1) 流动的水体直接对船体的冲击；2) 因船体的非光滑性和水体的黏性，船体和水流发生相对运动时产生的摩擦力。由边界层理论可知，当水体流经船体表面时，由于流体的黏性，流体会在船体表面形成一个边界层，边界层内流体的流速梯度很大。由牛顿内摩擦定律可知，流速梯度越大船体受到的摩擦力越大。船体在大流速作用下，受到的冲击及摩擦力会变大，其纵向合力也就越大。

从船舶下行沿纵向线 S2 通过丁坝附近的受力情况可知，船舶在不同流速作用下所受纵向力的变化呈现出相似的规律(图 9)。当船舶沿纵向线 S2 下行通过丁坝附近，在丁坝上游 $X/L_s = 1 \sim 2.18$ 处所受纵向力变化较为平缓，随着船舶中心向坝轴靠近，其纵向受力快速增大，当船舶中心位于丁坝下游 $X/L_s = 0.06 \sim 0.28$ 倍船长范围时，纵向力极值出现，且随着水流速度增大，极值点有向下游推移的趋势。船舶纵向受力极值的位置和大小与船舶横向距丁坝的距离有着密切关系(图 10)，当船舶位于 S1 时其在坝轴附近受力的大小比 S2 和 S3 时要小，S2 和 S3 两种工况下纵向力极值相近，但 S3 工况下极值出现的位置更偏向下游。

ADV 量测的流速结果与受力情况相符合(图 4、5)，水流纵向流速变化在丁坝上游 1 倍坝长前即 0.66 倍船长前比较平缓，随着离坝头距离的减小纵向流速会快速增大，且越靠近坝头速度变化越快。水流流速的增大，使水体对船体的冲击及摩擦力增大，船舶所受纵向力也发生相应变

化。在船舶中心驶过坝轴后，由于水流在流过丁坝后，过水断面扩大导致流速降低，水流对船体的纵向作用减弱，船舶所受纵向力逐渐减小。

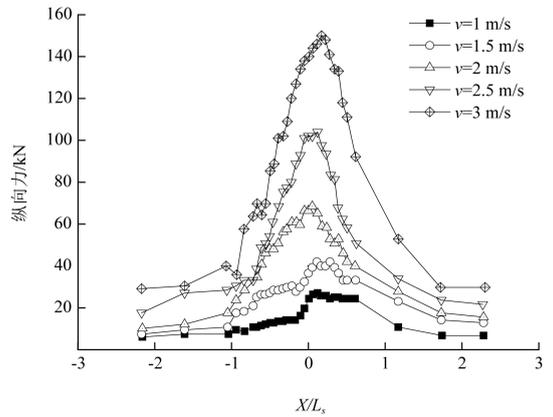


图9 S2 断面船舶纵向受力沿程变化

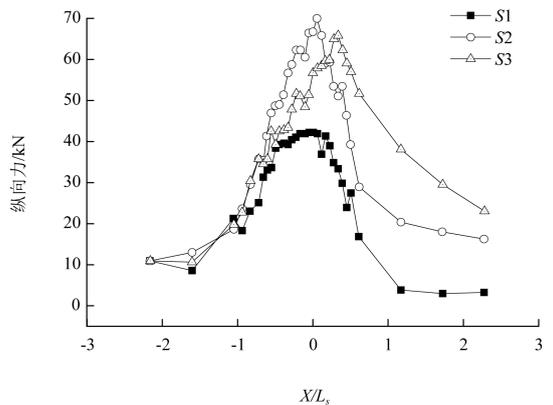


图10 不同断面船舶纵向受力沿程变化 ($v = 2 \text{ m/s}$)

2.3 通航安全距离

实际船舶航行中，为保证航行安全会根据水情远离丁坝坝头一定距离，避开丁坝不良水流区域，这个距离的最小值即为通航安全距离。根据前述丁坝区流速及船舶受力情况分析，在距离丁坝坝头 30~40 cm 处(即 $Y = 0.9 \sim 1.0 \text{ m}$)，船舶所受横向力迅速减小趋于零且力的变化率也趋于 0，即 $0.5D \sim 0.67D$ 处。值得注意的是受试验条件所限，本次试验未能对船舶的横摇、倾覆现象开展研究，随着将来试验条件的改善，将做进一步研究。

3 结论

1) 船舶行经丁坝，所受横向力沿程出现一个波峰、一个波谷，坝轴是船舶所受横向力发生正负

转变的位置坝。船舶所受横向力的正向(推力)极值,出现在船体中心移动至丁坝上游 0.56~0.67 倍船长范围,负向(吸力)峰值出现在船体中心位于丁坝下游 0.11~0.44 倍船长范围。纵向受力极值出现位置为船舶中心位于丁坝下游 0.065~0.28 倍船长范围,且随着来流流速增大,极值点出现有向下游推移的趋势。

2) 船舶船头由上游即将经过坝轴到船尾完全离开坝轴这一区间内,横向流速变化将越快,船舶所受横向力大、变化速率快且推力和吸力转换,这对船舶操纵及安全航行带来极其不利的影 响,船舶在航行中应避开此段丁坝影响。

3) 为保证航行安全、避开丁坝不良水流区域,根据丁坝区流速及船舶受力情况分析,在本文的实验条件下,取船舶横向受力迅速减小趋于 0,且力的变化率也趋于 0 作为通航安全距离的取值标准,得到通航安全距离为距丁坝坝头 0.5D~0.67D。

参考文献:

- [1] 胡旭跃.航道整治[M].北京:人民交通出版社,2008.
- [2] Ahmed M. Experiments on design and behavior of spur dike [C]//Proc in Minnesota International Hydraulics Convention.Minneapolis, MN:[s.n.],1953:145-159.
- [3] Grade R J, Subramanya K, Nambudripad K D. Study of scour around spur-dike[J].Journal of Hydraulic Division:

ASCE, 1961, 87(6):23-37.

- [4] Gill M A. Erosion of sand beds around spur-dikes [J]. Journal of Hydraulic Division: ASCE, 1972, 98(9): 1 587-1 601.
- [5] Jennifer G. Duan A A, Mary Y. Sediment sorting around experimental spur dike [C]//World Environmental and Water Resources Congress.USA:[s.n.],2008:1-11.
- [6] 窦国仁,柴挺生,樊明,等.丁坝回流及其相似律的研究[J].水利水运科技情报,1978(3):1-24.
- [7] 许光祥,程昌华.丁坝挑角对坝田淤积的影响[J].水运工程,1994(8):34-37.
- [8] 张柏山,吕志咏,祝立国.绕丁坝流动结构实验研究[J].北京航空航天大学学报,2002,28(5):585-588.
- [9] 周宜林,道上正规,桧谷治.非淹没丁坝附近三维水流运动特性的研究[J].水利学报,2004,35(8):46-53.
- [10] 陈稚聪,黑鹏飞,丁翔.丁坝回流分区机理及回流尺度流量试验研究[J].水科学进展,2008,19(5):613-618.
- [11] 王慧.丁坝坝头对通航水流条件的影响距离[D].长沙:长沙理工大学,2010.
- [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试验研究[J].安全与环境学报,2010,10(5):167-172.
- [13] 胡旭跃,杨陆鑫,沈小雄,等.勾头长度对非淹没丁坝周围水流特性的影响[J].水运工程,2015(10):88-95.
- [14] GB 50139—2004 内河通航标准[S].

(本文编辑 郭雪珍)

· 消 息 ·

二航局 2 项研究成果达国际先进水平

近日,二航局“浮码头 L 型布置钢栈桥智能同步提升系统”、“斯里兰卡科伦坡外环高速公路设计关键技术研究”2 项研究成果经湖北省科技厅鉴定,达到国际先进水平。

“浮码头 L 型布置钢栈桥智能同步提升系统”针对码头水位差较大、航道贴岸、客流量大的特点,开展了客运浮码头平面布置形式、栈桥提升工艺及栈桥提升自动化控制等技术研究,既节省人力,又保障了作业人员安全。

“斯里兰卡科伦坡外环高速公路设计关键技术研究”开展了路线线形设计方法、异型桥梁结构分析以及新型加筋挡土墙方面的专项研究,研究成果已全面应用于实际工程,实施效果良好。

http://en.ccccltd.cn/pub/ccccltd/xwzx/zgsdt/201605/t20160505_47556.html (2016-05-10)