文章编号:1672-3031(2010)03-0214-06

弯道水流的能量耗散规律及其应用

李志威, 方春明

(中国水利水电科学研究院 泥沙研究所,北京 100048)

摘要: 天然河湾的弯曲平面形态和离心力作用,引起弯道的水流能量重新分配和耗散规律发生变化。基于弯道水 流能量平衡方程,总结了弯道水流的能量耗散主要原因,推导了弯道水流的横向与纵向能量耗散率的表达式,并 采用弯道水槽实验数据验证和率定表达式的参数。运用弯道水流能量耗散规律,本文初步解释了三峡水库建成蓄 水后,下泄清水将使得荆江河湾的水流能量横向耗散增强,凹岸区域严重冲刷,凸岸区域显著淤积,单个河湾的 弯曲度将变大。

关键词:弯道水流;能量平衡;能量耗散率;河湾

中图分类号: TV147 文献标识码: A

弯曲是天然河流的本性。天然河流的弯曲形状,使得进入其中的水流必须经受弯曲边界的约束 和离心力的双重作用,水流能量重新分配和耗散规律发生变化。天然河湾是一个开放的动态系统, 其水流能量耗散遵循于最小能耗率原理^[1-4]。

弯道水流能量的分配和耗散是一个非常复杂且重要的问题,迄今为止,这个问题仍没有很好解 决。罗索夫斯基曾得到了宽矩形弯道的水流能量横向耗散率表达式^[5]。张海燕运用最小能耗率原理, 研究弯道水流能量耗散率的问题^[6],建立了一个计算弯道水流能耗率的分析模型,并与实测数据吻合 较好。张红武还推导得到了弯道水流能量损失表达式^[7]。为使这个问题的研究得到清晰和深化,本文 从弯道水流的能量平衡方程出发,总结了弯道水流能量的耗散主要原因,推导了弯道水流能量的横 向与纵向耗散率的表达式,并运用水流能量耗散规律初步地解释了三峡水库下泄清水对荆江河湾演 变的影响。

1 弯道水流能量平衡方程

重力是驱使水流从高处向低处运动的根本动力,水流能量平衡方程始终控制着水流的运动过 程。水流行进在弯曲河道中,河道的床面和两侧岸壁组成了弯道水流的边界条件,离心力的存在促 使弯道的凹岸水面高于凸岸水面,即出现水面横向比降。水流沿纵轴向运动的同时,所有的水质点 都受到的径向压力梯度,在两侧河岸的约束下,凹岸的水流指向河底,凸岸的水流指向水面,如此 便形成了复杂的螺旋流运动。

根据能量守恒原理,弯道水流运动将遵循水流能量平衡方程,但它的能量耗散与顺直河道却不 尽相同。本文概化的单弯道如图1所示,选取弯道进口直段的断面1-1和出口直段的断面2-2作为参 考,以断面2-2为基准面,列弯道水流能量平衡方程如下,

$$\frac{\alpha_1 \nu_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 \nu_2^2}{2g} = LJ + E_r + E_\theta + E_e$$
(1)

式中: α_1 、 α_2 分别为断面1和断面2的动能修正系数; ν_1 、 ν_2 分别为断面1和断面2的断面平均流速; *L*为断面1–1到断面2–2的纵向河长; *J*为坡降; *g*为重力加速度; *E*,为横向环流引起的流体内摩

收稿日期: 2010-01-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10772201)

— 214 —

作者简介:李志威(1984-),男,湖北云梦人,硕士生,主要从事河流动力学研究。E-mail: lzhiwei2009@163.com

擦损失; *E_θ* 为弯道河岸和河床的边界阻力引起的能量损失; *E_e为弯道内水流分离或突然水跃造成的* 涡旋耗散的能量损失。

由式(1)可知,弯道水流的耗散能量全部来源于水流重力做功。由于弯道环流的附加作用,在 相同的水深、流速和糙率下河湾的单位河长水流能量耗散率大于顺直河道^[6]。弯道水流能量耗散增 大的原因主要是横向环流引起的流体内摩擦耗能,弯道边界阻力耗能及急弯中水流能量,对降低水 流流速和保持河势稳定具有积极作用,这为保持自然河流的蜿蜒性提供了理论支持。



图1 弯道平面示意

2 弯道水流能量耗散规律及应用

2.1 弯道水流的能耗率 由于急弯水流分离及突然水跃的涡漩耗散能量的不确定性和复杂性,故暂 不考虑涡漩造成的水流能量损失。假定水流为恒定缓流,在弯道环流充分发展的条件下,将弯道水 流能量耗散可分为弯道环流引起的横向能量耗散和边界阻力引起的纵向能量耗散。采用文献[5]对弯 道水流能量耗散率的研究方法,推导弯道横向和纵向水流能量耗散率的表达式。

$$P = P_r + P_\theta \tag{2}$$

式中: $P = \gamma Q J$, $P_r = \gamma Q J_r$, $P_{\theta} = \gamma Q J_{\theta}$ 。 $P \times P_r \times P_{\theta}$ 分别为弯道的总能量耗散率、横向耗散率及纵向 耗散率; $J \times J_r \times J_{\theta}$ 分别为总水面比降、横向水面比降及纵向水面比降; γ 为水的重度; Q为流量。

弯道环流是弯道水流离心力和重力共同作用的结果。单位长度弯道的水流能量横向耗散率可以 通过离心力和重力共同做功来表示,即为

$$P_r = \int_{r_1}^{r_2} \int_0^h \rho \left(\nu_r \frac{\nu_{\theta}^2}{r} + \nu_z g \right) \mathrm{d}z \mathrm{d}r \tag{3}$$

式中: r、 θ 、z分别为流场中某点的柱坐标; ν_r 、 ν_θ 、 ν_z 分别为r、 θ 、z相应的流速分量,即横向、纵向及垂向分速; ρ 为水的密度; g为重力加速度; r_1 , r_2 分别为凸岸弯曲半径和凹岸弯曲半径; h为水深。

考虑弯道垂向分速 ν_z 相对于横向向速 ν_r 和纵向流速 ν_{θ} 为小量,故可以忽略。式(3)可简化为,

$$P_r = \int_{r_1}^{r_2} \int_0^h \rho \nu_r \frac{\nu_{\theta}^2}{r_c} \mathrm{d}z \mathrm{d}r \tag{4}$$

式中: r_c为弯道中心线半径。

根据式(4),为求得水流横向能量耗散率,必须知道弯道水流纵向分速和横向分速。由文献 [8-10]可知,弯道水流纵向流速采用指数流速公式具有较高精度且形式简单,公式如下,

$$\nu_{\theta} = (m+1)V\left(\frac{z}{h}\right)^{m} \tag{5}$$

式中:m与雷诺数、相对粗糙度及水流含沙浓度有关,一般情况下, $m \in [1/18, 1/5]$;V为断面平均流速;z为从河底算起的水深;h为断面平均水深。

— 215 —

1986年, A.J.Odgaard教授在整理前人弯道环流流速试验数据时,发现环流流速近似呈线性分布^[11]。 随后,他结合指数型纵向流速分布公式,经过严谨地理论推导得到了线性环流流速分布公式^[12]。

$$\nu_r = \varphi \frac{Vh}{r_c} \left(2\frac{z}{h} - 1 \right) \tag{6}$$

其中: $\varphi = \frac{1}{\kappa^2} \frac{(2m+1)(m+1)}{(2m^2+m+1)}, m = \kappa C/\sqrt{g}, \kappa$ 为卡门常数, C为谢才系数。作者采用罗索夫斯基、曾

庆华及张红武弯道水槽实验数据,验证和比较了常见的弯道环环流速公式和线性环流流速公式的精度。经反复试算后得出,当 φ =5.5时,改进后线性环流流速公式具有形式简单和精度高的优点,故将Odgaard公式的改进如下,

$$\nu_r = 5.5 \frac{Vh}{r_c} \left(2\frac{z}{h} - 1 \right) \tag{7}$$

将式(5)和式(7)代入式(4),积分后可得弯道水流能量的横向耗散率为

$$P_{r} = \frac{11}{2} \gamma Q F_{r}^{2} \frac{m^{2} + m}{2m + 1} \left(\frac{h}{r_{c}}\right)^{2}$$
(8)

式中: F_r 为弗劳德数, $F_r = V/\sqrt{gh}$ 。

由曼宁公式, $V = \frac{1}{n} h^{2/3} J^{1/2}$, 总水流能量耗散率可表示为

$$P = \gamma Q J = \gamma Q F_r^{2} g n^2 h^{-1/3}$$
(9)

式中: n为粗糙系数,可查糙率表得到。

用式(9)减去式(8),可得弯道水流能量的纵向耗散率为

$$P_{\theta} = \gamma Q F_{r}^{2} \left(g n^{2} h^{-1/3} - \frac{11}{2} \frac{m^{2} + m}{2m + 1} \left(\frac{h}{r_{c}} \right)^{2} \right)$$
(10)

由式(8)和式(9),弯道水流能量的横向耗散率与总能量耗散率之比,

$$\frac{P_r}{P} = \frac{11}{2} \frac{m^2 + m}{2m + 1} \left(\frac{h}{r_c}\right)^2 h^{-1/3} / \left(gn^2\right)$$
(11)

采用张海燕的弯道水槽实验数据^[5],如表1所示。此外,弯道水槽实验的糙率*n*=0.013,平均水 深*h*=0.975m,弯道中心线半径*r*=43.66m。

采用表1的实验数据,验证式(11)并与张海燕公式对比。选取横向坐标为(h/r_e)2,纵坐标为P/

表1 弯道水流能量耗散实验数据^[5]

坐标	数值									
$(h / r_c)^2$	0.000 25	0.000 32	0.000 42	0.000 5	0.000 68	0.000 9	0.001 35	0.001 45	0.001 86	0.002 1
P_r/P	0.06	0.12	0.1	0.23	0.08	0.31	0.45	0.32	0.43	0.48

P,分别选取不同的m值,绘制不同的曲线,比较曲线与实测数据吻合程度,最终确定较理想的参数 m值。

从图2可以看出,弯道水流能量耗散率的实测数据略分散,这与能坡值对水面比降的测量值非常 敏感有关。当*m*=1/7和*m*=1/10时,式(10)的计算值比实测值偏大;当*m*=1/13时,式(11)与张海燕公 式非常接近,且与实测数据符合较好。略显不足的是可供验证的实测数据只有一组,为提高式(11) 的可信度和通用性,后续必须寻求通过增加的弯道水槽实验,率定适合弯道水流能量耗散规律的参 数*m*值。

2.2 水流能耗规律的初步应用 长江荆江河段是典型的天然河湾,蜿蜒曲折,河道现状长度约为 170km,人工裁湾前长度约为 240km,而直线距离仅约 80km。三峡水库建成蓄水后,将长期下泄清水,可能极大地影响荆江河段的河床演变。尽管荆江的河型是否会发生转化,尚无统一的意见,但

— 216 —



图2 式(10)与实测资料验证

荆江河道将承受长河段长时期的清水冲刷,河性将发生很大变化已成共识^[13-14]。下面从弯道水流能量 耗散的角度,初步分析未来的荆江河湾演变的演变趋势,特别是对于单一河湾,凹岸的冲刷,崩岸 和展宽将增大局部河段的弯曲率。

从长时间平均考虑,三峡建坝前,荆江河湾单位体积的水流能量耗散率为

$$E_{1} = \frac{1}{t} \int_{0}^{t} \gamma J_{1} L_{1} dt + \frac{1}{t} \int_{0}^{t} \gamma \frac{\alpha_{1} V_{1}^{2}}{2g} dt$$
(12)

式中: t为时间; J₁、L₁、V₁分别建坝前河道比降、长度、平均流速。

同理,三峡建坝后,荆江河湾单位体积的水流能量耗散率为

$$E_{2} = \frac{1}{t} \int_{0}^{t} \gamma J_{2} L_{2} dt + \frac{1}{t} \int_{0}^{t} \gamma \frac{\alpha_{2} V_{2}^{2}}{2g} dt$$
(13)

式中: t为时间; J₂、L₂、V₂分别建坝后河道比降、长度及平均流速。

三峡水库建成蓄水后下泄清水,将改变下游河道的年平均径流量、来沙量以及水沙过程,从而 引起下游河湾的响应和几何形态调整。三峡水库建成后,将大幅度地抬升水头以利蓄水发电,使得 大坝下游的荆江河湾年内和年际间的径流量趋于均匀化,即平均流速V₂的变化幅度将大为降低,同 时引起水流的动能和挟沙能力的相应减小。

对于式(12)和式(13),在相同的时间 t内,

$$\frac{1}{t} \int_0^t \gamma \, \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \mathrm{d}t > \frac{1}{t} \int_0^t \gamma \, \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \mathrm{d}t \tag{14}$$

与此同时,天然河流是一个开放的动态系统,在一定时间内将通过自身几何形态的调整,以保持单位河长的时均总能耗率接近相等,即*E*₁=*E*₂,故有

$$\frac{1}{t} \int_0^t \gamma J_2 L_2 \mathrm{d}t > \frac{1}{t} \int_0^t \gamma J_1 L_1 \mathrm{d}t \tag{15}$$

上式表明,当水库建成蓄水后,荆江河湾的来水量将趋于均匀和时均动能的减小,这将导致荆江河 段的水流势能发生改变,即河道纵比降 J₂和纵向长度 L₂都有可能变大。同时,水库将持续下泄清 水,水流挟沙能力处在严重非饱和状态,河道的水流必须依赖冲刷河床和河岸获取泥沙,以达到水 流挟沙力的沿程恢复。河道延长纵向长度的唯一办法就是造成凹岸的严重冲刷和凸岸的显著淤积。 河湾的河长变大使得河湾的弯曲度增大,弯道的边界阻力随之变大,同时在急弯的条件下水流易产 生边界分离和水跃的涡漩能耗,河湾的横向能量耗散将增强。此外,根据河流最小能耗原理,由于 河道纵比降 J₂有增大的趋势,河流为了达到单位水流能耗率最小,也必须通过延长河道的纵向长度 L₂来减小纵比降 J₂。

然而,对于荆江河床未来演变来说,问题要复杂得多,其演变方向具有一定的不确定性。文献 [14]认为下荆江将来冲刷过程中,河床坡降富余并不依赖于河长增加,而是依靠藕池口与城陵矶之 间的落差减小来实现,三峡水库下泄水流的含沙量缓慢恢复和床沙粗化也将起到一定的辅助作用。

— 217 —

考虑到荆江堤防的加固和未来护岸工程的加强,荆江整体平面形态变化的可能性较小,河道的纵向 长度变化将不会太大。但对于单个河湾,水流挟沙力处在严重非饱和,凹岸冲刷和凸岸淤积在所难 免,使得局部河段的河长延伸成为可能,这也正是需要关心的问题。为验证上述解释的合理性和正 确性,特别选取三峡水库兴建前后,下荆江的监利河段荆145和石首弯道段进口荆90的河床高程变 化,作河床冲淤对比图予以证实,如图3。



图3 荆江河床冲淤对比

从相隔5年的短期冲淤对比图3来看,荆90凹岸最大冲刷深度已超过12m,而荆145的局部最大 冲刷深度已达25m,凸岸有冲有淤,冲淤幅度均在5m左右。荆江将经历长时期和长河段冲刷,图3 还只是2个局部横断面,了解整个断面的冲刷情况需要大量的河床测验数据。荆江河道局部的强幅冲 刷,为河岸的崩塌和展宽创造了条件,这对堤防安全和荆江防洪都是不利的。可以预见三峡水库长 期运行后,长江中游的荆江河段必将经历持续的大幅度冲刷,近期在河弯凹岸区域河床冲刷量和冲 刷深度将逐年扩大,直至达到短期的平衡。河弯凹岸的崩塌和展宽,将使得河弯的蜿蜒性将增大, 这要求在河势规划与整治时必须为河弯留有河长增加的余地。在不采取坚固的护岸工程前提下,荆 江河弯的弯曲度将变大和平面变形加剧。

3 结论

(1)本文基于弯道水流能量平衡方程,总结了弯道水流能量耗散的主要原因是横向环流引起能 耗、弯道河岸和河床阻力能耗,和急弯中水流分离或突然水跃所造成涡漩的能耗。

(2)采用指数流速公式和改进线性环流流速公式,得到了弯道横向和纵向水流能量耗散率的定量 表达式,并采用弯道实测资料验证弯道水流能量的横向耗散率与总能量耗散率之比,计算表明当指 数流速公式的系数 *m*=1/13 时,计算值与张海燕公式非常接近,且与实测数据符合较好。

(3)运用水流能量耗散规律,从理论上分析了在三峡水库运行后,荆江河湾需要通过延长河道的 纵向长度来减小纵比降。考虑到藕池口与城陵矶之间的落差将减小,下泄水流含沙量缓慢恢复和床 沙粗化等,加之人工护岸工程,荆江整体平面形态变化较小,河道的纵向长度变化将不会太大。但 单个河湾的凹岸冲刷和凸岸淤积不可避免,使得局部河段的河长延伸成为可能,水流能量横向耗散 增强和河湾的弯曲度变大。

致谢:特别感谢曾庆华教授为本文给予有益的建议和数据。

参考文献:

- [1] Yang Chih Ted. Minimum unit stream power and fluvial hydraulics [J]. J. of Hydraulics Division, ASCE, 1976, 102(7): 919~934.
- [2] Yang Chih Ted, Song Charles C S. Theory of minimum rate of energy dissipation [J]. J. of Hydraulics Division, ASCE, 1979, 105(7): 769~783.

— 218 —

- [3] 孙东坡. 河流系统能量分配耗散关系的分析[J]. 水利学报, 1999(3): 49-53.
- [4] 徐国宾,练继建.流体最小熵产生原理与最小能耗率原理(II)[J].水利学报,2003(6):43-47.
- [5] Rozovskii I L. Flow of water in bends of open channels [M]. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, Israel, 1961.
- [6] Chang H H . Energy expenditure in curved open channels [J] . J . of Hydraulic Engineering . 1983, 109(7) : 1012-1021 .
- [7] 张红武.弯道环流研究[R].郑州:黄委会水利科学研究所,1985.
- [8] 陈永宽. 悬移质含沙量沿垂线分布[J]. 泥沙研究, 1984(1): 31-39.
- [9] 张红武, 吕昕. 弯道水力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [10] Zimmermann C, Kennedy J F. Transverse bed slopes in curved alluvial streams [J]. J. of Hydraulics Division, ASCE, 1978, 104(1): 33-48.
- [11] Odgaard A J. Meander flow model. I: development [J]. J. of Hydraulic Engineering, 1986, 112 (12): 1117-1135.
- [12] Odgaard A J. River-meander model. I: development [J]. J. of Hydraulic Engineering, 1989, 115 (11): 1433-1449.
- [13] 韩其为,何明民.三峡水库修建后下游长江冲刷及其对防洪的影响[J].水力发电学报,1995(3):34-45.
- [14] 韩其为,杨克诚.三峡水库修建后下荆江河型变化趋势的研究[J].泥沙研究,2000(3):1-10.

Energy dissipation law of bend flow and its implication

LI Zhi-wei, FANG Chun-ming

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: At river bends, the curving shape and centrifugal force redistribute water energy and change energy dissipation. Based on energy equilibrium equations of bend flow, the main reasons of bend flow energy dissipation are summarized and expressions of transverse and longitudinal water energy dissipation rate are derived. The parameters in the expressions are calibrated and validated with bend flume experiment data. According to energy dissipation regulation, it is preliminarily illuminated that clear water discharged from the Three Gorges Reservoir will strengthen transverse energy dissipation at bends along Jinjiang River, seriously scour concave bank areas, and markedly silt convex bank areas. Simultaneously, the sinuosity of individual bend will increase.

Key Words: Bend flow; energy equilibrium; energy dissipation rate; river bends

(责任编辑:李福田)