DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.01.015

傳銘焕,张志昌,梁锋,等.波状床面消力池水跃特性试验分析[J].水利水运工程学报,2016(1):100-106. (FU Ming-huan, ZHANG Zhi-chang, LIANG Feng, et al. Test analysis of characteristics of hydraulic jump on corrugated beds of stilling basin[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(1): 100-106.)

波状床面消力池水跃特性试验分析

傳铭焕^{1,2},张志昌²,梁 锋¹,郭曙啸¹,余建平¹ (1. 浙江省水利水电勘测设计院,浙江杭州 310002; 2. 西安理工大学,陕西西安 710048)

摘要:研究波状床面水跃共轭水深和水跃长度对于波状床面消力池的设计极为重要。根据已有文献关于波状 床面消力池水跃特性的试验资料,分析波状床面消力池共轭水深、水跃旋滚长度、水跃长度和水跃区消能率随 跃前断面弗劳德数、壁面粗糙高度、跃前断面和跃后断面水深的变化规律。给出了波状床面水跃跃后水深的半 理论公式和水跃旋滚长度、水跃长度的拟合公式,并对其进行验证,水跃共轭水深的平均误差分别为 4.5% 和 3.3%,水跃旋滚长度和水跃长度的平均误差分别为 7.4% 和 5.9%。研究表明,水跃跃后水深和水跃长度不仅是 跃前断面弗劳德数的函数,还是壁面粗糙高度的函数;波状床面消力池水跃区消能率远大于一般混凝土壁面消 能率,在相同弗劳德数情况下水跃区消能率随着壁面粗糙高度的增加而增加。

关 键 词: 波状床面消力池; 共轭水深; 水跃旋滚长度; 水跃长度; 粗糙高度 中图分类号: TV135.2⁺1 **文献标志码**: A **文章编号**:1009-640X(2016)01-0100-07

1 研究概况

水跃是水流从急流向缓流过渡时,水面突然跃起的一种局部水力现象,自1818年贝登(G. Bidone)对水 跃现象研究以来,至今已有近200年的历史。在水工建筑物中,常利用水跃进行消能,但水跃消能有一定局 限性,为了增加消能效果,减少工程投资,人们提出了一种新的消能形式,即粗糙壁面消力池。

粗糙壁面消力池有别于一般混凝土壁面消力池,它是将消力池底板进行人工加糙,使之成为粗糙面。加 糙块有石块、条块、方块和圆块,加糙块的布置形式有梅花形、方形、条形、均匀密排形和不均匀密排形。1984 年,W. C. Hughes 等^[1]通过模型试验研究了消力池底板加设横条以及密排砾石的水力特性。结果表明,各粗 糙壁面上形成的水跃跃后水深和水跃长度均小于一般混凝土壁面,跃后水深和水跃长度的减小量与跃前断 面弗劳德数和壁面粗糙高度有关。1991年,H. S. Mohamed Ali^[2]在消力池中加设立方体粗糙块,研究其水跃 长度的变化规律。试验发现,在弗劳德数为4~10范围内,加设立方块体后的粗糙壁面水跃长度比一般混凝 土壁面减小了 67.4%~27.4%。2007年,G. C. Francesco 等^[3]通过模型试验(粗糙高度范围为0~3.2 cm), 分析了在消力池底板密排砾石的水跃特性,其结果与文献[1]一致,即粗糙壁面能有效减小水跃跃后水深和 水跃长度,且随着壁面粗糙高度的增加,减小量愈明显。2008年,孙韵^[4]结合某工程,对泄洪闸出口的加糙 消力池体形进行了试验研究,研究表明,加糙后的消力池能显著衰减水跃脉动压强,冲刷后下游基本没有冲 坑,消能效果好,适用于实际工程,且工程量不大。同年,P. Stefano等^[5]将消力池底板进行不均匀加糙的新 型消能形式应用于实际河道改建工程,获得很好的消能效果,但水力计算较均匀加糙更为复杂。

近年来,有学者提出了新的粗糙壁面消力池体形——波状床面消力池。波状床面消力池的底板曲线,由 无数个相同波高和波长的波浪形组成,在空间上具有周期性。2002年,S. A. Ead 和 N. Rajaratnam^[6]对波状

收稿日期: 2015-04-10

作者简介:傅铭焕(1989—),男,浙江杭州人,硕士研究生,主要从事水工水力学方面的研究。E-mail:fuminghuan2007@ 163.com

床面水跃进行了试验研究,研究的粗糙高度为13和22mm,弗劳德数范围为4~10。结果表明,波状床面跃 后水深较一般混凝土壁面减小了20%~30%,水跃的旋滚长度减小了20%~50%。2009年,A. Abbaspour^[7] 试验分析了波状床面水跃的水力特性,研究的粗糙高度(模型值)为15~35mm,弗劳德数范围为3.98~ 8.05。结果表明,波状床面水跃的跃后水深减小20%,当弗劳德数小于6时,水跃长度比一般混凝土壁面减 小50%,当弗劳德数大于6时,水跃长度减小42%。2014年,张志昌等^[8]用边界层理论分析了波状床面消力 池水跃特性。研究发现,波浪形消力池的壁面切应力是跃前断面水深、断面最大流速、壁面粗糙度和距离的 函数,壁面阻力系数随着弗劳德数和粗糙高度的增加而增加,跃后水深和水跃长度与光滑消力池比较均有较 大幅度的减小。此外,2012年,M. J. Chevn等^[9]通过数值模拟的方法研究了波状床面消力池(正弦波状、三 角形波状、梯形波状)水跃跃后水深、水跃长度和水跃区壁面切应力的变化规律。结果表明各波状床面消力 池水跃跃后水深、水跃长度均小于一般混凝土壁面消力池,壁面切应力远大于一般混凝土壁面。

粗糙壁面消力池的空蚀破坏是制约其应用的一个重要影响因素。文献[10-12]的研究表明,对溢流面进行均匀加糙反而对防止空蚀破坏十分有利。但不管怎样,波状床面消力池的空蚀问题,仍是一个值得研究的问题,但本文对此不再进行探讨,只研究波状床面消力池的宏观水跃。

由以上研究可以看出,粗糙壁面消力池的跃后水深和水跃长度较一般混凝土壁面大大减小,能显著缩减 工程费用。但对波状床面消力池水跃特性的研究远没有一般混凝土壁面成熟,波状床面消力池水跃共轭水 深和水跃长度的研究成果亦很少。本文拟根据文献[6-7]的试验成果,分析波状床面消力池水跃跃后水深、 水跃长度和消能率的变化规律,并给出其计算公式,为工程应用提供技术支撑。

2 波状床面水跃的共轭水深

波状床面消力池如图 1 所示。图中, h_1 和 h_2 分别 为跃前和跃后断面水深, L_r 为水跃的旋滚长度, L_j 为 水跃长度, v_1 和 v_2 分别为跃前和跃后断面的平均流 速, e为闸门开度, F为床面摩阻力。S为波状床面的 波长,波峰与波谷间距离 k_s 为壁面粗糙高度。

文献[6-7]通过玻璃水槽分别对闸后出流的波状 床面水跃进行了试验研究,文献[6]试验的单宽流量为





0.051~0.207 m²/s,弗劳德数范围为 3.99~10.02,波状床面的粗糙高度 k_s为 0.013~0.022 m,波长 S 为 0.068 m,文献[7]试验的单宽流量为 0.06~0.157 m²/s,弗劳德数范围为 3.98~8.05,波状床面的粗糙高度 k_s为 0.015~0.035 m,波长 S 为 0.04~0.7 m,具体参数见表 1。文献[6]对实测的跃后水深值进行拟合,波状床面跃后水深表达式为:

$$h_2/h_1 = Fr_1 \tag{1}$$

文献[7] 对实测跃后水深进行分析,得波状床面跃后水深为:

$$h_2/h_1 = 1.114\ 6Fr_1\tag{2}$$

2005 年 Tokyay 也提出相似计算公式^[7],即:

$$h_2/h_1 = 1.122 \ 3Fr_1 + 0.036 \ 5$$
 (3)

根据文献[6-7]的实测资料,分别对式(1)~(3)进行验证,计算结果见表1。由表1可知,式(1)计算文 献[6]的跃后水深平均误差为3.4%,但计算文献[7]的跃后水深的平均误差却达到10.1%。可见式(1)计 算不同粗糙高度波状床面跃后水深的通用性不强,而且在所计算的29组工况下,只有1组所得的跃后水深 值略大于实测值,其余28组均小于实测值,工程应用并不安全。式(2)计算文献[7]的跃后水深平均误差为 3.9%,但计算文献[6]所得的跃后水深的平均误差达到9.0%,式(2)的通用性亦存在欠缺。Tokyay 提出的 式(3)计算的文献[6]跃后水深平均误差为10.3%,公式精度最差。 分析认为式(1)~(3)在计算波状床面水跃跃后水深时只考虑了跃前断面弗劳德数,而忽视了波状床面 重要参数粗糙高度 k_s和波长 S 的影响,公式形式并不完整。

表1 跃后水深计算值对比

Tab. 1 Comparison of calculated sequent depth of corrugated beds

文献[6]试验工况						各公式计算情况							
q/	$k_{\rm s}$ /	S/	h_1	E.	实测值	式(1) ^[6]	误差/	式(2) ^[7]	误差/	式(3) ^[7]	误差	式(12)	误差/
$(m^2 \cdot s^{-1})$	m	m	m	rr_1	h_2/m	h_2/m	%	h_2/m	%	h_2/m	/%	h_2/m	%
0.051	0.013	0.068	0.025 4	4.02	0.104	0. 102	-1.71	0.114	9. 55	0.116	11.20	0.114	9. 542
0.063	0.013	0.068	0.025 4	4.97	0.128	0. 126	-1.35	0. 141	9.96	0. 143	11.44	0.138	7.891
0.076	0.013	0.068	0.025 4	6.00	0.145	0. 152	5.05	0.170	17.09	0.172	18.54	0. 163	12.739
0.089	0.013	0.068	0.025 4	7.02	0.188	0.178	-5.11	0. 199	5.76	0. 201	6.98	0.188	0.079
0.101	0.013	0.068	0.025 4	7.97	0.200	0. 202	1.22	0.226	12.82	0. 228	14.06	0.210	5.204
0.114	0.013	0.068	0.025 4	9.00	0.233	0. 228	-1.93	0.255	9.30	0.257	10.46	0.234	0.447
0.127	0.013	0.068	0.025 4	10.02	0.263	0. 255	-3.21	0.284	7.88	0. 287	8.98	0.257	-2.192
0.143	0.013	0.068	0.0508	3.99	0.210	0.203	-3.49	0.226	7.57	0. 229	9.20	0.210	0.142
0.207	0.013	0.068	0.050 8	5.78	0.310	0. 293	-5.36	0.327	5.48	0.331	6.81	0. 295	-4.965
0.143	0.022	0.068	0.0508	3.99	0.210	0.203	-3.49	0.226	7.57	0. 229	9.20	0.223	6.127
0. 207	0.022	0.068	0.0508	5.78	0.310	0. 293	-5.36	0.327	5.48	0. 331	6.81	0.312	0. 568
文献[7]试验工况						各公式计算情况							
q/	$k_{\rm s}$ /	<i>S</i> /	$h_1 \swarrow$	E	实测值	式(1) ^[6]	误差/	式(2) ^[7]	误差/	式(3) ^[7]	误差	式(12)	误差/
$(m^2 \cdot s^{-1})$	m	m	m	rr_1	$h_2/{ m m}$	h_2/m	%	h_2/m	%	h_2/m	/%	h_2/m	%
0.074	0.015	0.04	0.022 0	7.24	0.171	0. 159	-6.80	0.178	3.88	0. 180	5.07	0.171	-0.255
0.109	0.015	0.04	0.033 0	5.81	0.209	0. 192	-8.29	0.214	2. 22	0.216	3.50	0.204	-2.191
0.121	0.015	0.04	0.045 5	3.98	0.207	0. 181	-12.46	0.202	-2.43	0. 205	-0.95	0. 194	-6.355
0.085	0.020	0.04	0.022 5	8.05	0. 193	0. 181	-6.21	0.202	4.54	0.204	5.69	0. 193	0. 193
0.106	0.020	0.04	0.035 0	5.17	0.209	0. 181	-13.40	0.202	-3.48	0.204	-2.20	0. 199	-4.901
0.157	0.020	0.04	0.045 0	5.25	0.273	0. 236	-13.40	0.264	-3.48	0.267	-2.21	0.254	-6.880
0.060	0.025	0.04	0.020 0	6.78	0.150	0.136	-9.65	0.151	0.71	0. 153	1.89	0.148	-1.085
0.086	0.025	0.04	0.030 5	5.16	0.190	0.157	-17.21	0.175	-7.72	0.178	-6.50	0.176	-7.345
0.110	0.025	0.04	0.040 0	4.39	0.211	0.176	-16.73	0.196	-7.19	0. 199	-5.86	0. 197	-6.616
0.068	0.020	0.07	0.024 0	5.84	0.155	0.140	-9.54	0.156	0.83	0.158	2.09	0.155	0.007
0.130	0.020	0.07	0.035 0	6.34	0.238	0. 222	-6.73	0.247	3.95	0.250	5.21	0.239	0.270
0.128	0.020	0.07	0.0400	5.11	0.212	0.204	-3.57	0.228	7.49	0. 231	8.92	0.223	4.995
0.071	0.025	0.07	0.021 5	7.19	0.162	0. 155	-4.52	0.172	6.42	0.174	7.64	0.168	3.805
0.110	0.025	0.07	0.033 0	5.86	0.206	0. 193	-6.10	0.216	4.66	0.218	5.97	0.213	3. 391
0.136	0.025	0.07	0.044 0	4.71	0. 227	0. 207	-8.76	0.231	1.69	0.234	3.10	0.229	1.061
0.068	0.035	0.07	0.020 0	7.68	0.173	0.154	-11.22	0.171	-1.04	0. 173	0.06	0.165	-4.725
0.098	0.035	0.07	0.033 0	5.22	0. 197	0. 172	-12.52	0. 192	-2.50	0. 195	-1.21	0. 194	-1.607
0.112	0.035	0.07	0.039 0	4.65	0.214	0. 181	-15.34	0.202	-5.64	0.205	-4.33	0.205	-4.017

文献[13]研究了均匀密排粗糙壁面消力池共轭水深与跃前断面弗劳德数的关系,如图2所示。由图2 可知,共轭水深比与跃前断面弗劳德数近似服从线性关系,两者的线性关系随着跃前断面弗劳德数的增大开 始出现偏离,壁面粗糙高度越大,偏离程度越明显。由此可知,共轭水深不仅仅是跃前断面弗劳德数的函数, 还是壁面粗糙高度的函数。均匀密排粗糙壁面与波状床面同属粗糙壁面,均匀密排粗糙壁面共轭水深分布 对波状床面共轭水深研究具有一定的借鉴作用。 文献[14]通过边界层动量积分方程,理论研究了波 状床面水跃跃后水深的变化规律,提出了考虑壁面粗糙 高度的跃后水深计算公式,即

$$\left\{ \begin{aligned} \eta &= 2 \sqrt{\frac{1 + 2Fr_1^2 - C_f}{3}} \cos \left\{ \frac{1}{3} \arccos \left[\frac{-3\sqrt{3}Fr_1^2}{(1 + 2Fr_1^2 - C_f)^{3/2}} \right] \right\} \\ \left\{ C_f &= 4.232 \times 10^{-3} k_s^{0.2} v_1^2 (1.74Fr_1 + 3.62) (3.1958 - L_r^{-0.2}) / h_1 \\ L_r &= 1.756 (h_2 / k_s^{0.2})^{5/4} \end{aligned} \right.$$



图 2 文献[13] 共轭水深比 h_2/h_1 与弗劳德数 Fr_1 的关系

(4) Fig. 2 Relationships between h_2/h_1 and Fr_1 of literature [13]

式中:壁面阻力系数 $C_f = 2F/(\gamma h_1^2)$, γ 为水的重度。

式(4)计算的文献[6-7]跃后水深平均误差分别为5.9%和2.6%,可见用式(4)计算波状床面水跃跃后水深能获得很好效果。式(4)考虑了壁面粗糙高度 k_s的影响,公式形式更加全面,但在计算跃后水深时需同壁面阻力系数、水跃旋滚长度联合迭代求解,计算过程较为复杂。

对棱柱体矩形断面的跃前和跃后断面列动量方程,可得

$$\gamma h_1^2 / 2 - \gamma h_2^2 / 2 - F = \gamma q (v_2 - v_1) / g$$
(5)

式中: $v_1 = q/h_1$; $v_2 = q/h_2$; q = Q/b 为单宽流量, Q 为总流量, b 为消力池宽度。设 $\eta = h_2/h_1$, 如果假定 F = 0, 则得著名的 Belanger 水跃共轭水深公式, 即

$$\eta = (\sqrt{1 + 8Fr_1^2 - 1})/2 \tag{6}$$

但对于粗糙壁面,必须考虑床面摩阻力的影响,否则会给水跃计算带来很大误差。

2004年, Carollo和Ferro曾假设床面摩阻力为

$$F = \beta (M_1 - M_2) = \beta \rho q (v_1 - v_2)$$
⁽⁷⁾

式中: ρ 为水流密度; M_1 , M_2 为单位时间内通过跃前和跃后断面水流所具有的动量; β 为动量系数, 且 $\beta < 1$ 。 将式(7)代入式(5), 可得: $\gamma h_1^2/2 - \gamma h_2^2/2 = \gamma (1 - \beta)q(v_2 - v_1)/g$ (8)

对式(8)进行求解,得: $\eta = (\sqrt{1 + 8(1 - \beta)Fr_1^2} - 1)/2 = (\sqrt{1 + 8\alpha Fr_1^2} - 1)/2$ (9) 式(9)即为波状床面水跃共轭水深的理论解,式中 α 为考虑波状床面壁面粗糙高度和波长的系数,该系数需 通过试验确定。

分析了文献[6]和[7]的实测资料,得到 $\alpha(k_s/h_1)^{0.3}Fr_1^3$ 与 $(h_1 + k_s)(S + k_s)^{0.1}/(k_sS^{0.1}Fr_1^4)$ 的关系如图 3 所示,由图 3 可得

$$\alpha = \frac{2.078}{Fr_1^{0.332}} \frac{h_1^{0.3}k_s^{0.367}}{(h_1 + k_s)^{0.667}} (\frac{S}{k_s + S})^{0.0667}$$
(10)

图 3
$$\alpha(k_s/h_1)^{0.3}Fr_1^3 \subseteq (h_1 + k_s)(S + k_s)^{0.1}/(k_sS^{0.1}Fr_1^4)$$
的关系
Fig. 3 Relationships between $\alpha(k_s/h_1)^{0.3}Fr_1^3$ and $(h_1 + k_s)(S + k_s)^{0.1}/(k_sS^{0.1}Fr_1^4)$

根据文献[6]和[7]的实测资料, $(S/(k_s + S))^{0.0667} \approx 0.9774$, 所以式(10)可以简化为

$$\alpha = \frac{2.031}{Fr_1^{0.332}} \frac{h_1^{0.3}k_s^{0.367}}{(h_1 + k_s)^{0.667}}$$
(11)

将式(11)代入式(9)可得波状床面水跃跃后水深显式解的半理论公式,即

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 16.250 \ 4Fr_1^{1.668}} \ \frac{h_1^{0.3}k_s^{0.367}}{(h_1 + k_s)^{0.667}} - 1 \right)$$
(12)

式(12)的适用范围为弗劳德数 4<Fr1<10,壁面粗糙高度 0.013 m<k2<0.035 m,0.191<k2/S<0.625。

式(12)不仅考虑了跃前断面弗劳德数的影响,还考虑了壁面粗糙高度对波状床面水跃跃后水深的影响,形式更为合理,且计算简便。

采用文献[6]和[7]的实测资料对式(12)进行验证,验证结果见表 1。从表 1 可见,跃后水深计算值与 实测值接近,平均误差分别为 4.5%和 3.3%,在 29 组计算值中,只有一组数据误差超过 10%,为 12.739%。 分析认为这是由于水跃旋滚末端紊动强烈,水面上下波动,给施测者带来困难造成的。

3 波状床面的水跃长度和旋滚长度

波状床面消力池水跃旋滚长度和水跃长度示意见图 1。水跃旋滚长度是指跃首断面到旋滚末端的水平 距离,水跃长度是指跃首到跃后水深近似等于尾水水深这一断面间的距离。文献[6]给出了不考虑壁面粗 糙高度的水跃旋滚长度近似计算公式,即: L_r = (1.74Fr₁ + 3.62)h₁ (13)

利用文献[6]的试验数据分析式(13),发现式(13)的平均误差为 30.5%,显然用式(13)计算波状床面水跃 旋滚长度的精度偏低。对文献[6]的试验数据重新整理 分析,得到 $L_r/h_1 与 h_1/(h_2 + k_s)$ 的关系如图 4 所示,对 图中的数据进行拟合得

$$\frac{L_{\rm r}}{h_1} = 1.899 \ 4(\frac{h_1}{h_2 + k_{\rm s}})^{-1.268}$$
(14)

上式的平均误差为 7.4%, 精度明显高于文献[6]给 Fig. 4 Relationships between L_r/h₁ 出的式(13)。式(14)的适用范围为 4<Fr₁<10,0.013 m<k_s<0.022 m,0.191<k_s/S<0.32。

对于水跃长度,分析文献[6]的实测资料,得到 $\frac{L_j}{h_1 + k_s}$ 与 $\frac{L_r}{h_1 + k_s}$ 的关系如图 5 所示,由图 5 可得

$$\frac{L_{\rm j}}{h_1 + k_{\rm s}} = 1.010 \ 4 \frac{L_{\rm r}}{h_1 + k_{\rm s}} + 2.573 \ 9 \tag{15}$$

将式(14)代入式(15),即可得到波状床面水跃长度计算式为

$$\frac{L_{\rm j}}{h_1 + k_{\rm s}} = 1.919 \frac{(h_2 + k_{\rm s})^{1.268}}{h_1^{0.268}(h_1 + k_{\rm s})} + 2.5739 \quad (16)$$

上式的平均误差为 5.9%。图 5 中还绘出了文献 [14]计算的波状床面水跃长度,可以看出式(16)和文 献[14]计算的水跃长度十分接近。

4 波状床面消力池的消能率

水跃的消能量(水跃总水头损失)ΔE可由下式 计算^[15]:



图 5 $L_j/(h_1 + k_s)$ 与 $L_r/(h_1 + k_s)$ 的关系 Fig. 5 Relationships between $L_j/(h_1 + k_s)$ and $L_r/(h_1 + k_s)$



4 Relationships between
$$L/h$$
, and $h/(h_{2} + k)$

$$\Delta E = (h_1 + \frac{v_1^2}{2g}) - (h_2 + \frac{v_2^2}{2g})$$
(17)

水跃区消能率为:
$$K_j = \frac{\Delta E}{E_1} = \left[(h_1 + \frac{v_1^2}{2g}) - (h_2 + \frac{v_2^2}{2g}) \right] / (h_1 + \frac{v_1^2}{2g})$$
 (18)

对于矩形断面,式(18)整理得:
$$K_j = 1 - \frac{2(h_2/h_1)^3 + Fr_1^2}{(h_2/h_1)^2(2 + Fr_1^2)}$$

式(19)即为矩形断面水跃消能率的计算公式。对于 波状床面消力池,将式(12)代入式(19),即可得到波状床 面的消能率。将波状床面和一般混凝土壁面计算的消能 率与弗劳德数的关系绘入图 6。可以看出,波状床面的消 能率明显高于一般混凝土壁面,4<*Fr*₁<10,0.013 m<*k*_s< 0.035 m,0.191<*k*_s/*S*<0.625 范围内,水跃区消能率增加 了(3~30)%。在相同弗劳德数情况下,水跃区消能率随 壁面粗糙高度的增加而增加。



5 结 语

Fig. 6 Relationships between K_j and Fr_1

本文根据文献[6]和[7]的实测资料,分析并给出了波状床面水跃共轭水深、水跃旋滚长度、水跃长度和 消能率的计算方法。研究表明,共轭水深比、水跃旋滚长度和水跃长度不仅是跃前断面弗劳德数的函数,还 是壁面粗糙高度的函数。水跃共轭水深比的计算式(1)~(3)没有考虑壁面粗糙高度的影响,公式的通用性 不强;式(4)计算的跃后水深平均误差分别为5.9%和2.6%,公式精度最高,但是计算需联合迭代求解,过程 较为复杂;本文给出的半理论式(12)为显式计算式,计算的平均误差分别为4.5%和3.3%,能满足工程实际 应用,且计算简便。水跃旋滚长度式(13)忽略了粗糙高度的影响,计算误差偏大,无法满足工程应用要求。 本文提出的式(14)考虑了壁面粗糙高度的影响,计算式的平均误差为7.4%。在4<*Fr*₁<10,0.013 m<*k*_s< 0.035 m,0.191<*k*_s/*S*<0.625 范围内,水跃区消能率增加了(3~30)%,在相同弗劳德数情况下,水跃区消能 率随壁面粗糙高度的增加而增加。

参考文献:

- [1] HUGHES W C, ERNEST F J. Hydraulic jump properties over a rough bed [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984, 110 (12): 1755-1771.
- [2] MOHAMED ALI H S. Effect of roughened-bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jump[J]. Journal of Hydraulic Engneering, 1991: 117(1): 83-93.
- [3] FRANCESCO G C, VITO F, VINCENZO P. Hydraulic jumps on rough beds[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 133(9): 989-999.
- [4] 孙韵. 加糙消力池水力特性的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008. (SUN Yun. Study on hydraulic characteristics of artificial roughness bed stilling basin[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese))
- [5] STEFANO P, ILARIA L, MICHELE P. Hydraulic jump on rough bed of stream rehabilitation structures [J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2008(2): 29-38.
- [6] EAD S A, RAJARATNAM N. Hydraulic jumps on corrugated beds [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(7): 656-663.
- [7] ABBASPOUR A, HOSSEINZADEH D A, FARSADIZADEH D, et al. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2009(3): 109-117.
- [8] 张志昌,傅铭焕,赵莹,等. 波浪形底板消力池自由水跃特性的探讨[J]. 应用力学学报,2013,30(6): 870-875. (ZHANG

(19)

Zhi-chang, FU Ming-huan, ZHAO Ying, et al. Study on properties of free hydraulic jump on corrugated beds of stilling basin[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013,30(6): 870-875. (in Chinese))

- [9] CHERN M J, SVAMSURI S. The effect of corrugated bed on hydraulic jump characteristics using SPH Method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 139: 221-232.
- [10] ARNDT R, JPPEN P A T. Rough surface effects on cavitation inception [J]. Journal of Basic Engneering, 1968, 90(2): 249-261.
- [11] 聂孟喜. 明流反弧段加糙防蚀的初步试验研究[J]. 水力发电学报, 1987, 6(4): 79-88. (NIE Meng-xi. Preliminary experimental study of roughening bucket for cavitation protection in open flow[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1987, 6 (4): 79-88. (in Chinese))
- [12] EAD S A, RAJARATNAM N, KATOPODIS C, et al. Turbulent open- channel flow in circular corrugated culverts [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(10): 750-757.
- [13] 张志昌,傅铭焕,李若冰,等. 加糙消力池共轭水深和水跃长度的试验分析[J]. 水利水运工程学报,2013(6): 61-66.
 (ZHANG Zhi-chang, FU Ming-huan, LI Ruo-bing, et al. Test analysis of conjugate depth and hydraulic jump length of roughened stilling basin[J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(6): 61-66. (in Chinese))
- [14] 张志昌,傅铭焕,李若冰. 波状床面消力池共轭水深和水跃长度的计算[J]. 水力发电学报,2014,33(5):120-127.
 (ZHANG Zhi-chang, FU Ming-huan, LI Ruo-bing. Calculation of conjugate depth and length of jump on corrugated beds of stilling basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(5): 120-127. (in Chinese))
- [15] 张志昌. 水力学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011: 80-83. (ZHANG Zhi-chang. Hydraulics[M]. Beijing: China WaterPower Press,2011: 80-83. (in Chinese))

Test analysis of characteristics of hydraulic jump on corrugated beds of stilling basin

FU Ming-huan^{1,2}, ZHANG Zhi-chang², LIANG Feng¹, GUO Shu-xiao¹, YU Jian-ping¹

(1. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hangzhou 310002, China; 2. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: It is very important to carry out studies of conjugate water depth and length of hydraulic jump for design of the corrugated beds of the stilling basin. According to the test data about characteristics of the hydraulic jump in the existing literatures, the change laws of the conjugate water depth, length of roller, length of the hydraulic jump, and energy dissipation ratio with upstream Froude number, roughness height, initial depth of free hydraulic jump, sequent depth of the hydraulic jump are studied. The semi-theoretical formula of the conjugate water depth, and the fitting formulas of the length of roller, length of the hydraulic jump are put forward and verified using the test results. The mean errors of the conjugate water depth are respectively 4.5% and 3.3%, and the length of roller and the length of the hydraulic jump are not only related to the upstream Froude number, and also to the roughness height of the wall surface. The energy dissipation ratio of the corrugated beds is much more than that on the smooth bed, that increases with the increase of the roughness height of the wall surface under the same upstream Froude number.

Key words: corrugated beds of stilling basin; conjugate water depth; length of roller; length of hydraulic jump; roughness height