

# 加糙消力池共轭水深和水跃长度的试验分析

张志昌，傅铭煥，李若冰，赵莹  
(西安理工大学，陕西 西安 710048)

**摘要：**在总结国内外加糙消力池水力特性研究的基础上,给出密排加糙消力池的共轭水深和水跃长度的计算方法。根据 W. S. Hughes 等对密排加糙消力池共轭水深和水跃长度的试验资料,利用量纲和谐原理研究密排加糙消力池的水跃方程和水跃长度随弗劳德数、跃前断面水深、跃后断面水深和壁面粗糙度的变化规律。结果表明:密排加糙消力池的共轭水深随着跃前断面弗劳德数的增大而增大,随着壁面粗糙度的增大而减小;水跃长度也是跃前和跃后断面水深、跃前断面弗劳德数和壁面粗糙度的函数;水跃区的消能率随着壁面粗糙度的增加而增加。提出了密排加糙消力池共轭水深和水跃长度的计算式,并用其他学者已有试验资料验证了计算式的可靠性。

**关 键 词：**密排加糙消力池；共轭水深；水跃长度

**中图分类号：**TV135.2<sup>+1</sup>      **文献标志码：**A      **文章编号：**1009-640X(2013)06-0061-06

加糙消力池就是将消力池底部做成粗糙面,粗糙面有波浪形粗糙面、人工加糙粗糙面。波浪形粗糙面就是将消力池底部做成规矩的波浪形,波长为  $S$ ,波峰到波谷的距离即为粗糙度  $k_s$ ;人工加糙粗糙面就是在消力池底部设置加糙块,加糙块有石块、条块、方块和圆块,布置形式有梅花形、方形、条形、均匀密排和不均匀密排形。

1965 年,N. Rajaratnam<sup>[1]</sup> 在对壁面附壁射流的研究中,提出了水跃也是一种附壁射流的新概念。并通过试验研究了波浪形粗糙壁面附壁射流区的水力特性,主要包括附壁射流底部附近的边界层区域和边界层以上的混合层区域的断面流速分布、最大流速的沿程变化、边界层的沿程发展。在边界层区域,流速分布符合指数律或对数律,其指数的变化范围为  $1/2 \sim 1/14$ ,在混合区,流速分布具有相似性。20 世纪 70 年代,N. Rajaratnam 和 H. J. Leutheusser<sup>[2]</sup> 等进一步通过试验研究了波浪形消力池的水跃长度和共轭水深,结果表明,在粗糙底板上的水跃长度明显小于光滑底板上的水跃长度,跃后水深也小于光滑壁面的跃后水深,消力池紊动加剧,消能率提高。1984 年,W. S. Hughes 等<sup>[3]</sup> 在消力池中加设横条以及密排砾石。横条形状为矩形,试验的横条高度分别为 3.18 和 6.35 mm,横条宽度均与高度相同,横条的间距分别为 4 倍和 3.75 倍的横条高度。试验密排砾石的高度分别为 4.3, 6.4 和 11.3 mm,研究表明,与光滑壁面比较,在各种弗劳德数情况下,跃后水深和水跃长度均减小,在弗劳德数大于 3.5 时,跃后水深减小更加明显。1991 年,H. S. Mohamed Ali<sup>[4]</sup> 在消力池加设立方块体,专门研究水跃长度的变化规律,立方块体的布置形式为梅花状,块体的边长为 1.6 cm,纵向间距为 5.11 cm,横向间距为 5.14 cm。研究表明,当弗劳德数为 4 ~ 10 时,水跃长度比光滑壁面减小了 67.4% ~ 27.4%,并给出了计算水跃长度的公式。2002 年,S. A. Ead 等<sup>[5]</sup> 对波浪形加糙消力池的研究表明,跃后水深减小了 20% ~ 30%,水跃的旋滚长度减小了 20% ~ 50%。2007 年,F. G. Carollo 等<sup>[6]</sup> 研究了消力池底板密排砾石的水跃特性,研究的粗糙度范围(模型)为 0 ~ 3.2 cm;结果表明,随着粗糙度的增加,共轭水深比减小,水跃长度减小。2008 年,孙韵<sup>[7]</sup> 结合某工程,进行了在消力池中加横条的试验研究,横条的高度分别为 50/3 和 62/3 mm,横条宽度为 10 mm,横条间距为 83.3 mm,试验的弗劳德数为 1.43 ~ 1.51。结果

收稿日期：2013-03-28

作者简介：张志昌(1954-),男,陕西西安人,教授级高级工程师,主要从事水工水力学研究。

E-mail: zhangzhichang1954@163.com

表明,加糙后消力池的水流流态平稳,降低了跃后水深和尾坎高度,消力池的脉动压强减小,下游流速分布均匀,消力池长度不增加。2008年,S. Pagliara等<sup>[8]</sup>结合河道改建工程,提出了在消力池底板设置不均匀糙度的新型消能形式;试验表明,不均匀糙度床面的共轭水深比、水跃长度比密排粗糙的更为减小,说明此种消能形式有更好的消能效果,但水力计算更为复杂。2009年,A. Abbaspour等<sup>[9]</sup>研究了波状床面粗糙度为0.015~0.035 m的水跃特性,结果表明,跃后水深减小了20%;当弗劳德数小于6时,水跃长度比光滑床面减小了50%,当弗劳德数大于6时,水跃长度减小了42%。2013年,M. J. Chern等<sup>[10]</sup>通过数值模拟研究了正弦波状床面、三角形波状床面和梯形波状床面3种不同床面消力池的水跃特性,结果表明正弦波状床面消能效果最好。

由以上的研究可以看出,在溢流面上适当均匀加糙,消力池的水跃长度和跃后水深均减小,消能率提高,可以大幅减小工程费用。因此对加糙消力池水力特性的研究在理论和工程实际中都具有重要意义。

本文根据W. C. Hughes等<sup>[3]</sup>对粗糙壁面消力池的试验成果,研究粗糙壁面消力池的共轭水深和水跃长度的计算方法,取粗糙度范围为0.43~1.13 cm,弗劳德数范围为2.1~10.5。同时利用F. G. Carollo<sup>[6]</sup>的试验资料验证粗糙壁面水跃共轭水深计算的可靠性,为工程设计提供技术支撑。

## 1 加糙消力池的共轭水深

加糙消力池如图1所示。图中 $h_1$ 和 $h_2$ 分别为跃前和跃后断面的水深, $L_j$ 为水跃长度, $k_s$ 为粗糙度, $v_1$ 和 $v_2$ 分别为跃前和跃后断面的平均流速, $F$ 为床面摩阻力。对矩形断面的跃前和跃后断面写动量方程,可得

$$\frac{1}{2}\gamma h_1^2 - \frac{1}{2}\gamma h_2^2 - F = \frac{\gamma}{g}q(v_2 - v_1) \quad (1)$$

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 $\eta = h_2/h_1$ ,假定 $F = 0$ ,则得著名的

Belanger水跃共轭水深公式为

$$\eta = \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1) \quad (2)$$

但对于粗糙壁面,如果忽略了壁面阻力,将会带来很大的误差。所以在加糙消力池中,必须考虑壁面阻力的影响。根据H. J. Leutheusser等<sup>[11]</sup>的研究,粗糙壁面水跃共轭水深的公式为

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

式中: $\varepsilon$ 为不均匀流速分布的修正系数。文献[3]研究表明, $\varepsilon$ 与跃前断面动量修正系数 $\beta_1$ 、跃首处脉动水流的动量通量系数 $I_1$ 、跃首处压力非线性分布系数 $K_1$ 、壁面切应力 $\tau_0$ 、水跃长度 $L_j$ 、跃前和跃后断面水深有关。 $\varepsilon$ 的表达式为

$$\varepsilon = (\beta_1 - 1) + \frac{\sqrt{f_1 f_2}}{8} \left( \frac{2.5 L_j}{h_2} \right) \frac{h_2/h_1}{(h_2/h_1 - 1)} \quad (4)$$

式中: $f_1$ 和 $f_2$ 分别为跃前断面和跃后断面处考虑壁面和边墙的总摩擦系数。但文献[3]没有给出计算 $f_1$ 和 $f_2$ 的方法,无法计算水跃的共轭水深。

文献[3]和[6]对加糙消力池的共轭水深进行了试验,试验条件为:壁面的粗糙高度为0.0043~0.0320 m,跃前断面的弗劳德数为2.1~10.5,单宽流量为0.032~0.103 m<sup>3</sup>/(s·m)。现将试验结果进行整理,得到共轭水深比 $h_2/h_1$ 与跃前断面弗劳德数 $Fr_1$ 的关系如图2所示。

可以看出,在同一弗劳德数的情况下,随着壁面粗糙度的增加,共轭水深比减小,说明壁面粗糙度对减小跃后水深有重要的作用。

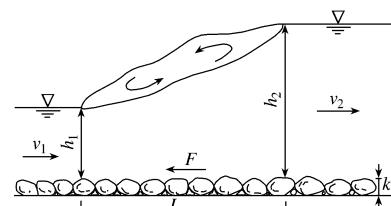


图1 加糙消力池

Fig. 1 Sketch of roughened stilling basin with uniform gravel bed

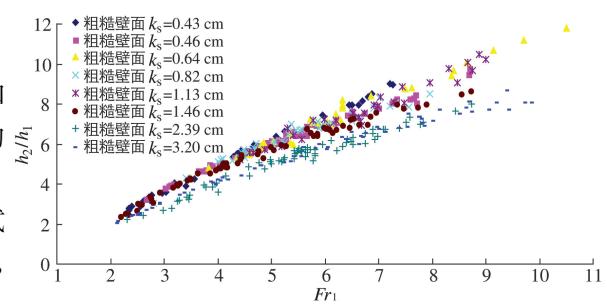


图2 共轭水深比 $h_2/h_1$ 与弗劳德数 $Fr_1$ 的关系

Fig. 2 Relationship between  $h_2/h_1$  and  $Fr_1$

为了计算加糙消力池的共轭水深, 可以将式(2)变形为:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8\alpha Fr_1^2} - 1) \quad (5)$$

式中:  $\alpha$  为考虑壁面粗糙度的系数, 该系数需通过试验确定.

分析认为, 系数  $\alpha$  与跃前断面水深、跃后断面水深水跃、跃前断面弗劳德数和壁面粗糙度有关. 根据表 1 的试验结果, 得出  $\alpha Fr_1^2$  与  $(h_1 + k_s)/(h_2 Fr_1^2)$  的关系如图 3 所示, 由图中可得:

$$\alpha = \frac{0.929}{Fr_1^{0.667}} \left( \frac{h_2}{h_1 + k_s} \right)^{0.666} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)得:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{7.438 \cdot 4 Fr_1^{1.332}}{(h_1 + k_s)^{0.666}} h_2^{0.666}} - 1 \right) \quad (7)$$

上式的适应范围同试验条件. 式(7)中考虑了跃前断面水深、跃前断面弗劳德数和壁面粗糙度的影响, 计算的跃后水深与实测的跃后水深的比较见表 1. 由于试验数据较多, 表 1 只列出了典型弗劳德数情况下的计算结果. 计算跃后水深与实测值相比, 其平均误差为 3.77%, 在总共 94 组数据中, 只有 3 组误差超过 10%. 可见, 除个别点误差较大外, 绝大多数计算结果与实测结果吻合.

## 2 加糙消力池的水跃长度

目前对加糙消力池的水跃长度的研究成果很少. 文献[3]给出了水跃长度的试验数据(如表 1), 但未给出水跃长度的计算公式. 分析认为, 水跃长度也是跃前和跃后断面水深、跃前断面弗劳德数和壁面粗糙度的函数. 根据文献[3]实测的水跃长度, 拟合相对水跃长度  $L_j Fr_1 / (h_1 + h_2)$  与  $h_1 / (h_2 + k_s)$  的关系如图 4 所示. 由图 4 可得水跃长度的计算公式为:

$$L_j = 2.314 \cdot 8 \frac{(h_1 + h_2)}{Fr_1} \left( \frac{h_2 + k_s}{h_1} \right)^{1.204} \quad (8)$$

式(8)即为粗糙壁面水跃长度的计算公式, 适应范围同试验条件. 公式中考虑因数比较全面, 既有跃前跃后断面水深, 又有跃前断面弗劳德数和壁面粗糙度. 用式(8)计算的水跃长度与实测结果比较见表 1, 可见计算结果与大多数实测结果相吻合, 平均误差为 7.43%, 有少数点的计算值与实测值相差较大, 主要原因是由于水流的脉动, 跃尾位置不稳定, 给测量带来了困难, 使得测量结果可能会出现较大的不确定性.

表 1 用式(7)和(8)计算的水跃跃后水深与水跃长度与文献[3]的实测值比较

Tab. 1 Comparison of the values of  $h_2$  and  $L_j$  calculated respectively by Eq. 7, Eq. 8 and literature[3]

$k_s/m$	$q/(m^2 \cdot s^{-1})$	实测 $h_1/m$	$Fr_1$	公式(7) $h_2/m$	实测 $h_2/m$	误差/ %	实测 $L_j/m$	公式(8) $L_j/m$	误差/ %
0.004 3	0.047	0.026	3.560	0.118	0.112	6.158	0.610	0.604	-0.956
0.004 3	0.045	0.032	2.550	0.098	0.091	6.925	0.457	0.481	5.138
0.004 3	0.043	0.027	3.040	0.102	0.098	4.776	0.488	0.511	4.847
0.004 3	0.038	0.015	6.630	0.128	0.119	7.688	0.640	0.687	7.341
0.004 3	0.038	0.020	4.440	0.110	0.110	0.000	0.579	0.571	-1.325

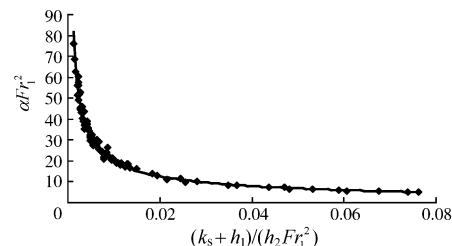


图 3  $\alpha Fr_1^2$  与  $(h_1 + k_s)/(h_2 Fr_1^2)$  的关系

Fig. 3 Relationship between  $\alpha Fr_1^2$  and  $(h_1 + k_s)/(h_2 Fr_1^2)$

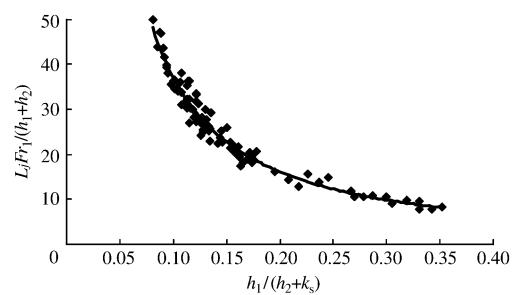


图 4  $L_j Fr_1 / (h_1 + h_2)$  与  $h_1 / (h_2 + k_s)$  的关系

Fig. 4 Relationship between  $L_j Fr_1 / (h_1 + h_2)$  and  $h_1 / (h_2 + k_s)$

(续表)

$k_s /$ m	$q /$ $(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	实测 $h_1 / \text{m}$	$Fr_1$	公式(7) $h_2 / \text{m}$	实测 $h_2 / \text{m}$	$h_2$ 误差/ %	实测 $L_j / \text{m}$	公式(8) $L_j / \text{m}$	$L_j$ 误差/ %
0.004 3	0.037	0.017	5.240	0.117	0.116	1.124	0.640	0.615	-3.961
0.004 3	0.037	0.018	5.080	0.115	0.113	1.486	0.671	0.604	-9.984
0.004 3	0.037	0.014	7.220	0.130	0.126	3.112	0.701	0.707	0.830
0.004 3	0.039	0.016	5.950	0.127	0.123	3.258	0.701	0.676	-3.638
0.004 3	0.041	0.016	6.510	0.134	0.126	5.763	0.732	0.722	-1.350
0.006 4	0.037	0.021	3.840	0.099	0.103	-3.888	0.518	0.494	-4.646
0.006 4	0.037	0.019	4.600	0.106	0.104	1.621	0.549	0.534	-2.578
0.006 4	0.032	0.011	9.150	0.115	0.114	0.675	0.640	0.592	-7.451
0.006 4	0.038	0.023	3.480	0.097	0.100	-3.342	0.457	0.481	5.189
0.006 4	0.038	0.017	5.350	0.114	0.114	-0.376	0.579	0.581	0.287
0.006 4	0.037	0.015	6.330	0.117	0.121	-2.908	0.610	0.606	-0.651
0.006 4	0.038	0.012	9.700	0.135	0.130	3.762	0.640	0.709	10.831
0.006 4	0.038	0.011	10.500	0.137	0.130	5.812	0.671	0.725	8.178
0.006 4	0.032	0.018	4.350	0.094	0.096	-2.126	0.488	0.470	-3.692
0.006 4	0.032	0.012	7.500	0.112	0.110	2.014	0.549	0.576	4.976
0.006 4	0.032	0.016	5.040	0.098	0.099	-1.064	0.518	0.493	-4.798
0.006 4	0.032	0.011	8.640	0.115	0.114	1.202	0.579	0.596	2.903
0.006 4	0.038	0.016	6.100	0.118	0.111	6.409	0.610	0.608	-0.236
0.011 3	0.045	0.018	6.080	0.123	0.123	-0.112	0.610	0.605	-0.798
0.011 3	0.043	0.016	6.630	0.119	0.119	-0.383	0.640	0.581	-9.294
0.011 3	0.044	0.019	5.200	0.112	0.113	-1.317	0.549	0.548	-0.204
0.011 3	0.045	0.019	5.570	0.116	0.116	0.069	0.549	0.570	3.816
0.011 3	0.044	0.014	8.470	0.130	0.127	2.377	0.610	0.637	4.567
0.011 3	0.044	0.015	7.950	0.128	0.133	-3.839	0.640	0.628	-1.930
0.011 3	0.044	0.013	9.000	0.131	0.137	-4.179	0.732	0.643	-12.097
0.011 3	0.040	0.014	7.480	0.117	0.115	1.380	0.610	0.568	-6.827
0.011 3	0.039	0.015	7.040	0.112	0.122	-8.187	0.610	0.545	-10.644
0.011 3	0.043	0.021	4.410	0.105	0.111	-5.274	0.549	0.515	-6.149
0.011 3	0.043	0.017	5.990	0.116	0.126	-8.054	0.579	0.568	-1.965
0.011 3	0.043	0.016	6.510	0.119	0.120	-0.861	0.579	0.583	0.617

### 3 加糙消力池水跃的消能率

自由水跃的消能量由下式计算

$$\Delta E = (h_1 + v_1^2/(2g)) - (h_2 + v_2^2/(2g)) = h_1(1 + v_1^2/(2gh_1)) - h_2(1 + v_2^2/(2gh_2)) \quad (9)$$

消能率为  $K_j = \Delta E/E_1 = [(h_1 + v_1^2/(2g)) - (h_2 + v_2^2/(2g))] / (h_1 + v_1^2/(2g)) \quad (10)$

对于矩形断面,  $1 + v_1^2/(2gh_1) = 1 + Fr_1^2/2$ ,  $h_1 v_1 = h_2 v_2$ , 代入上式整理得

$$K_j = 1 - \frac{2(h_2/h_1)^3 + Fr_1^2}{(h_2/h_1)^2(2 + Fr_1^2)} \quad (11)$$

式(11)即为矩形断面水跃消能率的计算公式. 对于粗糙壁面, 将式(7)代入上式, 即可得到粗糙壁面的消能率. 为了比较, 现将粗糙壁面和光滑壁面计算的消能率与弗劳德数的关系绘入图 5, 可见随着壁面粗糙度的增加, 水跃区的消能率增加. 在表 1 所示的试验结果中, 粗糙壁面的消能率比光滑壁面增加了 2% ~ 15%, 也说明增加壁面粗糙度有很好的消能效果.

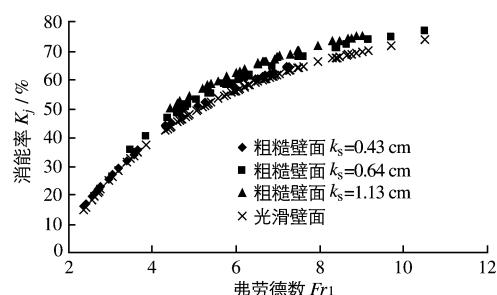


图 5 消能率  $K_j$  与弗劳德数  $Fr_1$  的关系

Fig. 5 Relationship between  $K_j$  and  $Fr_1$

## 4 验 证

现根据文献[6]对粗糙壁面的试验数据来验证式(7)的通用性。文献[6]试验的粗糙度共有5组,粗糙度 $k_s$ 分别为0.46,0.82,1.46,2.39和3.20 cm。由于 $k_s=0.46$  cm与文献[3]试验的粗糙度 $k_s=0.43$  mm相近,本文不再计算,其余粗糙度情况下用式(7)进行计算的跃后水深与实测结果的跃后水深平均误差为4.43%,在242组数据中只有17组数据的误差超过10%,误差较大的原因可能与测量时的水面波动、跃后水深难以测准有关,但绝大多数试验结果与计算结果是吻合的,可见用式(7)计算粗糙壁面水跃共轭水深是可行的。表2是 $k_s=3.2$  cm典型弗劳德数情况下计算与实测跃后水深的比较,由于数据较多,其余粗糙度的比较结果本文不再列出。

表2 计算跃后水深与文献[6]实测跃后水深比较

Tab. 2 Comparison of the values of  $h_2$  calculated by Eq. 7 and literature [6]

$k_s/m$	$h_1/m$	$Fr_1$	$q/(m^2 \cdot s^{-1})$	实测 $h_2/m$	公式(7)计算 $h_2/m$	误差/ %
0.032	0.063	2.100	0.103	0.128	0.126	-1.290
0.032	0.055	2.520	0.102	0.139	0.136	-2.058
0.032	0.049	2.890	0.098	0.145	0.140	-3.984
0.032	0.045	3.270	0.097	0.155	0.146	-6.077
0.032	0.043	3.510	0.097	0.157	0.149	-5.029
0.032	0.041	3.930	0.101	0.161	0.160	-0.465
0.032	0.039	4.020	0.097	0.162	0.156	-3.788
0.032	0.037	4.420	0.100	0.164	0.165	0.521
0.032	0.032	5.220	0.095	0.164	0.166	1.773
0.032	0.030	5.530	0.089	0.160	0.160	0.278
0.032	0.028	5.800	0.083	0.160	0.153	-4.173
0.032	0.028	6.030	0.089	0.164	0.164	0.000
0.032	0.027	6.650	0.094	0.175	0.176	0.452
0.032	0.028	6.990	0.100	0.186	0.188	0.941
0.032	0.024	7.110	0.083	0.158	0.160	1.439
0.032	0.023	7.350	0.078	0.153	0.152	-0.199
0.032	0.025	7.510	0.094	0.173	0.181	4.778
0.032	0.019	7.840	0.065	0.132	0.132	-0.300
0.032	0.023	7.990	0.088	0.165	0.173	5.026
0.032	0.021	8.120	0.076	0.159	0.152	-4.494
0.032	0.019	8.490	0.072	0.146	0.147	0.465
0.032	0.017	8.710	0.061	0.131	0.127	-2.562
0.032	0.020	9.040	0.078	0.151	0.159	5.256
0.032	0.018	9.410	0.071	0.139	0.148	6.679
0.032	0.016	9.710	0.060	0.127	0.129	1.157
0.032	0.016	9.890	0.064	0.128	0.137	6.663

## 5 结 语

本文在前人对密排加糙消力池试验研究的基础上,分析了密排加糙消力池的水跃特性,给出了计算密排加糙消力池共轭水深、水跃长度和消能率的计算式。研究表明,密排加糙消力池的共轭水深与弗劳德数的关系仍近似为线性关系;水跃长度与跃前和跃后断面水深、跃前断面弗劳德数和壁面粗糙度有关,随着壁面粗糙度的增大而减小;消能率随着壁面粗糙度的增加而增加,在表1所示的试验结果中,粗糙壁面的消能率比光滑壁面增加了2%~15%。为了验证计算式的正确性,还用F. G. Carollo的试验资料进行了对比分析,证明本文提出的计算方法是可靠的。

## 参 考 文 献:

- [1] RAJARATNAM N. Turbulentjets[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Co, 1976: 221-225.
- [2] LEUTHEUSSER H J, SCHILLER E J. Hydraulic jump in a rough channel[J]. Water Power & Dam Construction, 1975, 27(5): 25-34.
- [3] HUGHES W C, FLACK J E. Hydraulic jump properties over a rough bed[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984, 110(12): 1755-1771.
- [4] MOHAMED ALI H S. Effect of roughened-bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jump[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991, 117(1): 83-93.
- [5] EAD S A, RAJARATNAM N. Hydraulic jumps on corrugated beds[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(7): 656-663.
- [6] CAROLLO F G, FERRO V, PAMPALONE V. Hydraulic jumps on rough beds[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 133(9): 989-999.
- [7] 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. A study of hydraulic characteristics of artificial roughness bed stilling basin[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese))
- [8] PAGLIARA S, LOTTI I, PALERMO M. Hydraulic jump on rough bed of stream rehabilitation structures[J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2008, 2(1): 29-38.
- [9] ABBASPOUR A, HOSSEINZADEH DALIR A, FARSAZADEH D, et al. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics[J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2009, 3(2): 109-117.
- [10] CHERN M J, SYAMSURI S. The effect of corrugated bed on hydraulic jump characteristic using SPH Method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 139(2): 221-232.
- [11] LEUTHEUSSER H J, KARTHA V C. Effects of inflow condition on hydraulic jump[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1972, 98(8): 1367-1383.

## Test analysis of conjugate depth and hydraulic jump length of roughened stilling basin

ZHANG Zhi-chang, FU Ming-huan, LI Ruo-bing, ZHAO Ying  
*(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)*

**Abstract:** Calculation methods of conjugate depth and hydraulic jump length of the roughened stilling basin with uniform gravel bed are proposed in this study. According to the test data given by Hughes on the conjugate depth and hydraulic jump length of the roughened stilling basin with the gravel bed, hydraulic jump equation and the change law of hydraulic jump length with the upstream Froude number, upstream supercritical flow depth, downstream subcritical flow depth and roughness height are analyzed through the dimension concordant principle. The conjugate depth is increasing with the increasing in Froude number and decreasing with increasing in the roughness height. The hydraulic jump length is also the function of the upstream Froude number, upstream supercritical flow depth, downstream subcritical flow depth and roughness height. Meanwhile, energy dissipation ratio in the hydraulic jump region is increasing with increasing in the roughness height. Calculation formulas of the conjugate depth and the hydraulic jump length of the roughened stilling basin with uniform gravel bed, verified by the test results of F. G. Carollo, are put forward.

**Key words:** roughened stilling basin with uniform gravel bed; conjugate depth; hydraulic jump length