

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.06.010

傅铭焕, 张志昌. 密排加糙床面消力池自由水跃跃长计算[J]. 水利水运工程学报, 2016(6): 69-75. (FU Ming-huan, ZHANG Zhi-chang. Length calculation of free hydraulic jump on rough bed of stilling basin[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(6): 69-75.)

密排加糙床面消力池自由水跃跃长计算

傅铭焕^{1,2}, 张志昌²

(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: 水跃长度作为消力池设计的重要参数,对消力池安全稳定以及经济合理的影响效果显著。通过建立水跃区水体质点的运动方程,研究密排加糙床面消力池水跃旋滚长度和水跃长度的变化规律,提出了水跃旋滚长度和水跃长度计算的理论方法,并根据已有文献的试验数据对所推公式涉及的物理参数进行率定。计算研究结果表明,密排加糙床面消力池水跃旋滚长度和水跃长度均随跃前断面弗劳德数、跃前断面水深和水跃共轭水深比的增大而增大,随着床面当量粗糙高度的增加而减小。经验证发现,水跃旋滚长度和水跃长度的计算值与实测值接近。

关键词: 密排加糙床面; 运动方程; 水跃旋滚长度; 水跃长度

中图分类号: TV135.2⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2016)06-0069-07

在泄水建筑物下游往往需要布设消力池来抬高下游水深,使下泄水流形成淹没水跃,消耗高速水流量。为了提高消力池消能效果,各种辅助消能工应运而生,如消力墩、T形墩、齿墩等。近年来有人提出计算了粗糙壁面消力池,并对其水力特性进行了试验研究。研究表明,消力池底板上的连续凸体能显著提升水跃区水体的剪切与紊动强度,有效降低消力池的共轭水深和水跃长度,从而获得更好的消能效果^[1-4]。所谓的粗糙壁面消力池,就是将消力池底板做成连续的粗糙块,现阶段粗糙壁面消力池的布置形式主要有两种,一种为波状床面消力池,另一种为密排加糙床面消力池。文献[5-6]通过边界层理论和水跃区动量方程研究了波状床面消力池壁面切应力和水跃区边界层沿程发展规律,给出了水跃共轭水深和水跃长度的理论计算方法。文献[7]通过前人关于床面阻力的动量假设,提出了密排加糙床面水跃共轭水深计算的半理论公式。文献[8]对文献[1]和[3]作者提出的密排加糙床面水跃长度和水跃旋滚长度经验公式进行了验证,并提出了计算水跃长度和水跃旋滚长度新的经验公式。文献[9]研究了均布糙体和孤立糙体的空化特性,结果表明,均布糙体的初生空化数远低于孤立糙体;文献[10]在对明流反弧段加糙防蚀的研究中,认为在反弧段进行均匀加糙,对防止反弧末端的空蚀破坏十分有利。文献[11]对波状涵洞中流速的研究表明,波状床面水流紊动加剧,雷诺切应力增大,流速减小明显,空蚀的可能性亦减小。由此可见,在溢流面上适当的均匀加糙,对防止空蚀破坏是有利的。但现阶段对其水跃水力特性,尤其是水跃长度的研究仍停留在试验层面。文献[12]和[13]通过水跃区水体质点的运动方程,分别从理论角度研究了平底二元水跃和渐扩散水跃的水跃长度,获得了很好的效果。作者亦试图通过追踪水跃区水体质点的运动规律,探索密排加糙床面自由水跃长度理论计算的可行性,以供工程设计参考。

1 公式推导

1.1 水跃旋滚长度

1.1.1 理论分析 水流从急流到缓流的过渡过程中,上下游水流存在压力差使得水体向上跃起形成回流,

收稿日期: 2015-12-28

作者简介: 傅铭焕(1989—),男,浙江杭州人,硕士,主要从事水工水力学计算工作。E-mail: fuminghuan2007@163.com

假设使水流向上跃起的加速度为 f , 对于密排加糙床面消力池, 假定由于床面底部的凸起, 额外作用于水流质点竖直方向上的加速度为 Mf , 则密排加糙床面自由水跃水质点的受力情况如图 1 所示。图 1 中 h_1, h_2 分别为跃前断面和跃后断面水深; v_1, v_2 分别为跃前断面和跃后断面平均流速; L_r 为水跃旋滚长度; g 为重力加速度; k_s 为密排加糙床面粗糙高度; M 为由于床面的密排加糙额外在竖直方向上产生的加速度系数; x, y 为坐标轴, x 轴方向同水体主流方向, y 轴方向为竖直方向, 坐标原点为水跃跃前断面水面处。则水跃区水质点在竖直方向 y 上沿时间的运动方程为:

$$d^2y/dt^2 = (1 + M)f - g \quad (1)$$

式中: t 为水跃区水质点从跃前断面开始运动的时间; y 为水质点在 t 时间内在竖直方向上运动的距离。

对式(1)求不定积分可得:

$$dy/dt = [(1 + M)f - g]t + c_1 \quad (2)$$

$$y = 0.5[(1 + M)f - g]t^2 + c_1t + c_2 \quad (3)$$

式中: c_1, c_2 为积分常数。

假设在 $t = 0$ 时刻, 水质点位于坐标轴原点, 此时质点流速同主流方向, 即水质点在竖直方向上的瞬时速度为零, 可知:

$$dy/dt|_{t=0} = 0 \quad y|_{t=0} = 0 \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)和(3), 可得 $c_1 = 0, c_2 = 0$, 故

$$y = [(1 + M)f - g]t^2/2 \quad (5)$$

根据总流方程, 假定 $Q = v_1bh_1 = v_xb(h_1 + y)$ 。其中 v_x 为水质点流经 x 断面处的断面平均流速; b 为消力池宽度。假定水质点运动至 x 断面时在 x 轴方向上的瞬时速度正比于该断面的平均流速, 可得

$$dx/dt = av_x = av_1/(1 + y/h_1) \quad (6)$$

式中: a 为流速系数。

将式(5)代入式(6), 并对其变形可得

$$\frac{1}{av_1}dx = \frac{1}{1 + \frac{1}{2h_1}[(1 + M)f - g]t^2}dt \quad (7)$$

假定在 $t = 0$ 到 $t = t_r$ 时段内, 水质点从坐标原点运动至水跃旋滚末端水面处, 则对式(7)进行积分, 即

$$\int_0^{t_r} \frac{1}{av_1}dx = \int_0^{t_r} \frac{1}{1 + \frac{1}{2h_1}[(1 + M)f - g]t^2}dt \quad (8)$$

$$\text{整理式(8)可得: } \frac{L_r}{av_1} = \frac{\sqrt{2h_1}}{\sqrt{[(1 + M)f - g]}} \arctan \left[\sqrt{\frac{[(1 + M)f - g]}{2h_1}} t_r \right] \quad (9)$$

根据假定, $t = t_r$ 时, 水质点从原点运动至水跃旋滚末端水面, 此时 $y = h_2 - h_1$ 。将其代入式(5)可得:

$$t_r = \sqrt{2(h_2 - h_1)/[(1 + M)f - g]} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9), 即:

$$\frac{L_r}{av_1} = \frac{\sqrt{2h_1}}{\sqrt{[(1 + M)f - g]}} \arctan \sqrt{\frac{h_2 - h_1}{h_1}} \quad (11)$$

$$\text{整理式(11)得: } L_r = Fr_1 h_1 \arctan \sqrt{\eta - 1} \frac{\sqrt{2a}}{\sqrt{(1 + M)f/g - 1}} \quad (12)$$

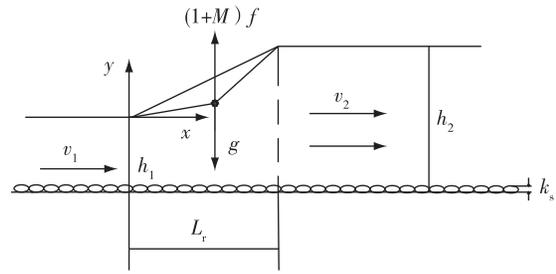


图1 密排加糙床面水跃

Fig. 1 Hydraulic jump on uniform rough height bed

式中: $Fr_1 = v_1 / \sqrt{gh_1}$ 为跃前断面弗劳德数; $\eta = h_2/h_1$ 为水跃共轭水深比。式(12)中的系数 a , M 和相对加速度 f/g 需通过试验确定。

当密排加糙床面转化成一般混凝土壁面时, $Mf=0$, 此时式(12)变为一般混凝土壁面消力池水跃旋滚长度, 即:

$$L_r |_{Mf=0} = Fr_1 h_1 \arctan \sqrt{\eta - 1} \sqrt{2a} / \sqrt{f/g - 1} \quad (13)$$

文献[14]分析认为, 在跃前断面弗劳德数 $Fr_1 = 1.82 \sim 7.67$ 范围内, 一般混凝土壁面水跃长度是水跃旋滚长度的 1.973~1.614 倍。取其均值, 故一般混凝土壁面水跃长度可表示为:

$$L_j |_{Mf=0} = 1.793 5L_r |_{Mf=0} + \text{erf}(L_r) \quad (14)$$

式中: $\text{erf}(L_r)$ 为水跃长度取 $L_j |_{Mf=0} = 1.793 5L_r |_{Mf=0}$ 时的偏离误差。

文献[15]提出的一般混凝土壁面水跃长度的计算式为:

$$L_j |_{Mf=0} = 6.55 Fr_1 h_1 \arctan \sqrt{\eta - 1} \quad (15)$$

联立求解式(13), (14)和(15), 可得:

$$\sqrt{2}a = 3.65 \sqrt{f/g - 1} + \text{erf}'(L_r) \quad (16)$$

式中: $\text{erf}'(L_r) = -\frac{\text{erf}(L_r) \sqrt{f/g - 1}}{1.793 5 Fr_1 h_1 \arctan(\sqrt{\eta - 1})}$ 。

将式(16)代入式(12), 得密排加糙床面水跃旋滚长度理论计算式为:

$$L_r = Fr_1 h_1 \arctan \sqrt{\eta - 1} \frac{3.65 \sqrt{f/g - 1} + \text{erf}'(L_r)}{\sqrt{(1+M)f/g - 1}} = 3.65 Fr_1 h_1 \arctan \sqrt{\eta - 1} D \quad (17)$$

式中: $D = \frac{\sqrt{f/g - 1} + \text{erf}'(L_r)/3.65}{\sqrt{(1+M)f/g - 1}}$ 为表征水质点相对加速度的参数。

文献[3]的作者进行了5种体形的密排加糙床面消力池水跃特性试验, 粗糙高度 k_s 分别为 0.46, 0.82, 1.46, 2.39 和 3.20 cm。根据文献[3]的试验工况, 对密排加糙床面水跃区水质点相对加速度参数 D 重新分析, 结果如图2所示, 图中 $d_s = 2k_s/(h_1 + h_2)$ 为消力池底板当量粗糙高度。由图2可知, 相对加速度参数 D 是跃前断面弗劳德数, 水跃共轭水深比和当量粗糙高度的函数, 并随着弗劳德数和当量粗糙高度的增加而减小, 随着水跃共轭水深比的增大而增大。拟合各工况的试验数据可得相对加速度参数 D 的计算式, 即:

$$D = 2.087 6 (Fr_1 - 1)^{-0.109 8} [d_s + 2(\eta - 1)/\eta]^{-1.109 8} \quad (18)$$

将式(18)代入式(17)即可得密排加糙床面自由水跃旋滚长度半理论计算式, 即:

$$L_r = 7.62 \frac{Fr_1 h_1 \arctan \sqrt{\eta - 1}}{(Fr_1 - 1)^{0.109 8} [d_s + 2(\eta - 1)/\eta]^{1.109 8}} \quad (19)$$

式(19)的适用范围为 $2.1 < Fr_1 < 9.89$, $0.037 8 < d_s < 0.447$ 。

由式(19)可知, 水跃旋滚长度随着跃前断面弗劳德数、跃前断面水深和水跃共轭水深比的增大而增大, 随着床面当量粗糙高度的增加而减小。

1.1.2 公式简化 由于密排加糙床面水跃的跃后条件往往是未知的, 故用式(19)来求解水跃旋滚长度存在一定困难。文献[8]提出的密排加糙床面水跃共轭水深为:

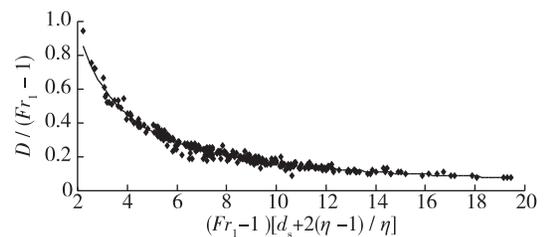


图2 参数 D 的分布

Fig. 2 Distribution of parameter D

$$\frac{h_2}{h_1} = 2.3145 (Fr_1 - 1)^{0.73872} \left[\exp\left(-\frac{k_s}{h_1 Fr_1^{2/3}}\right) \right]^{0.7776} \quad (20)$$

将式(20)代入式(19)可得:

$$L_r = 7.62 \frac{Fr_1 h_1 \arctan \sqrt{2.3145 (Fr_1 - 1)^{0.73872} \left[\exp\left(-\frac{k_s}{h_1 Fr_1^{2/3}}\right) \right]^{0.7776} - 1}}{(Fr_1 - 1)^{0.1098} \left\{ d_s + 2 \left[2.3145 (Fr_1 - 1)^{0.73872} \left(\exp\left(-\frac{k_s}{h_1 Fr_1^{2/3}}\right) \right)^{0.7776} - 1 \right] / \left[2.3145 (Fr_1 - 1)^{0.73872} \left(\exp\left(-\frac{k_s}{h_1 Fr_1^{2/3}}\right) \right)^{0.7776} \right] \right\}^{1.1098}} \quad (21)$$

可见,用式(21)计算水跃旋滚长度较为复杂,根据式(21)中水跃旋滚长度的变化规律,将其转化为:

$$L_r = 7.62 Fr_1 h_1 E / (Fr_1 - 1)^{0.1098} \quad (22)$$

式中: E 为床面粗糙高度、跃前断面水深和跃前断面弗劳德数的函数。

根据文献[3]的试验工况,分析得 E 随床面粗糙高度、跃前断面水深和跃前断面弗劳德数的变化规律如图3所示。由图3可得

$$E = 0.1485 Fr_1^{2.4164} / (Fr_1 - 1)^{1.8902} (h_1 / k_s)^{0.1} \quad (23)$$

将式(23)代入式(22),可得水跃旋滚长度的简化公式,即:

$$L_r = 1.1316 h_1 Fr_1^{3.4164} / (Fr_1 - 1)^2 (h_1 / k_s)^{0.1} \quad (24)$$

式(24)的适用范围为 $2.10 < Fr_1 < 9.89, 0.0378 < d_s < 0.4470$ 。

1.2 水跃长度

1.2.1 理论分析 对于密排加糙床面,文献[8]分析发现,当弗劳德数 $Fr_1 = 2.4 \sim 10.5$ 时,水跃长度为水跃旋滚长度的 $1.30 \sim 1.46$ 倍,取其均值 1.38 ,则水跃长度可表示为:

$$L_j = 1.38 L_r + \text{erf}_1(L_r) \quad (25)$$

式中: $\text{erf}_1(L_r)$ 为密排加糙床面水跃长度的偏离误差。

将式(25)代入式(17),可得:

$$L_j = 5.037 Fr_1 h_1 \arctan \sqrt{\eta - 1} D + 3.65 Fr_1 h_1 \arctan \sqrt{\eta - 1} D \text{erf}_1(L_r) = 5.037 Fr_1 h_1 \arctan \sqrt{\eta - 1} A \quad (26)$$

式中: A 为考虑水跃区相对加速度和水跃长度偏离误差的参数。式(26)即为密排加糙床面水跃长度的理论公式。

文献[1]研究了3种体形的密排加糙床面消力池水跃特性,粗糙高度 k_s 分别为 $0.43, 0.64$ 和 1.13 cm。根据文献[1]的试验工况,计算参数 A 如图4所示。由图4可知,参数 A 的分布规律与相对加速度参数 D 相似,仍是跃前断面弗劳德数,水跃共轭水深比和当量粗糙高度的函数。对各工况的试验数据进行拟合,可得

$$A = 9.0329 Fr_1^{-2.2536} (Fr_1 - 1)^2 [d_s + 2(\eta - 1)/\eta]^{-2.2536} \quad (27)$$

将式(27)代入式(26),可得水跃长度的半理论计算式为:

$$L_j = 45.4987 \frac{h_1 (Fr_1 - 1)^2 \arctan \sqrt{\eta - 1}}{Fr_1^{1.2536} [d_s + 2(\eta - 1)/\eta]^{-2.2536}} \quad (28)$$

式(28)的适用范围为 $2.4 < Fr_1 < 10.5, 0.0594 < d_s < 0.1750$ 。

可见,密排加糙床面水跃旋滚长度随着跃前断面弗劳德数、跃前断面水深和水跃共轭水深比的增大而增

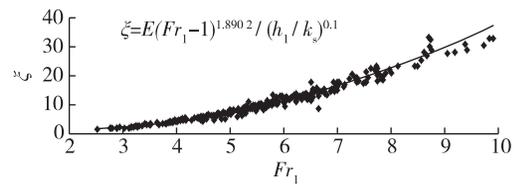


图3 参数 E 的分布

Fig. 3 Distribution of parameter E

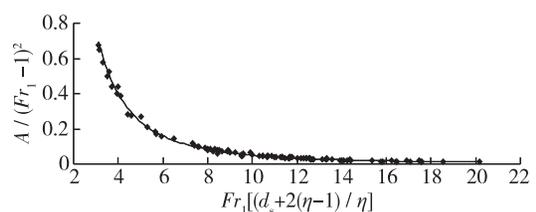


图4 参数 A 的分布

Fig. 4 Distribution of parameter A

大,随着床面当量粗糙高度的增加而减小。

1.2.2 公式简化 将式(20)代入式(28),并根据式(28)表明的函数关系,对其重新整理可得:

$$L_j = 45.4987h_1(Fr_1 - 1)^2 F / Fr_1^{1.2536} \quad (29)$$

式中: F 为床面粗糙高度、跃前断面水深和跃前断面弗劳德数的函数。

根据文献[3]的工况,对 F 随床面粗糙高度、跃前断面水深和跃前断面弗劳德数的变化规律进行分析,结果如图 5 所示,可得:

$$F = 0.0982Fr_1^{2.3719} / (Fr_1 - 1)^2 (h_1/k_s)^{0.1} \quad (30)$$

将式(30)代入式(29),则水跃长度计算式可简化为

$$L_j = 4.468h_1Fr_1^{1.1183}(h_1/k_s)^{0.1} \quad (31)$$

式(31)的适用范围为 $2.4 < Fr_1 < 10.5, 0.0594 < d_s < 0.1750$ 。

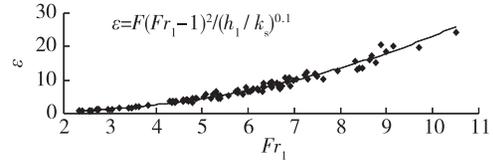


图 5 参数 F 的分布

Fig. 5 Distribution of parameter F

2 公式分析与验证

图 6 给出了文献[3]实测的水跃旋滚长度试验值与式(19)和式(24)计算的水跃旋滚长度计算值,图中弗劳德数范围为 2.10~9.89。从图 6 可以看出,式(19)和式(24)计算的水跃旋滚长度均与实测值接近。在 277 组试验工况中,式(19)计算的水跃旋滚长度平均误差为 6.60%,误差超过 10%的共有 57 组,其中误差 15%~20%的有 12 组,20%~30%的有 9 组,超过 30%的有 3 组。式(24)计算的水跃旋滚长度平均误差为 7.4%,误差超过 10%的共有 66 组,其中误差 15%~20%的有 12 组,20%~30%的有 8 组,超过 30%的有 3 组。

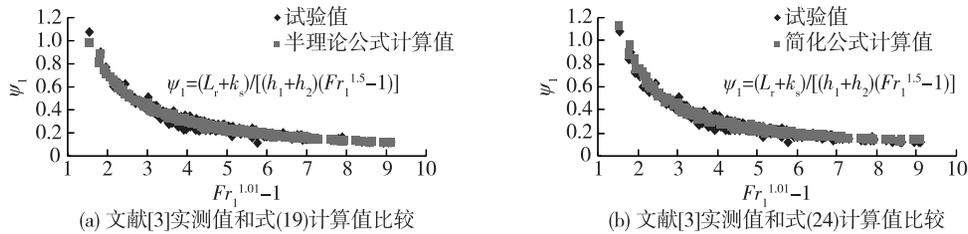


图 6 旋滚长度的比较

Fig. 6 Comparison of vortex roll lengths

文献[3]亦给出过考虑壁面粗糙高度的水跃旋滚长度经验计算式,即:

$$L_r = ch_1(Fr_1 - 1) \quad (32)$$

式中: $c = 6.525 \exp(-0.6k_s/h_1)$ 。

式(32)的水跃旋滚长度平均误差为 15%,误差大于 10%的有 179 组,其中 10%~20%的有 110 组,20%~30%的有 45 组,30%~40%的有 15 组,40%~50%的有 7 组,误差大于 50%的有 2 组^[8]。

文献[8]对文献[3]的试验成果重新进行优化分析,给出的水跃旋滚长度经验计算式为:

$$L_r = 0.9782(Fr_1^{1.01} - 1)^{-2.5035}(h_1 + h_2)(Fr_1^{1.5} - 1)^2 - k_s \quad (33)$$

式(33)的平均误差 4.25%,超过 10%的 54 组,其中有 20 组超过了 15%^[8]。由此可知,式(19)和式(24)计算的水跃旋滚长度精度远高于式(32)的计算值,而与式(33)的计算精度较为接近。

图 7 给出了文献[1]实测的水跃长度试验值与式(28)和式(31)计算的水跃长度计算值,图中弗劳德数范围为 2.4~10.5。由图 7 可知,式(28)和(31)的计算值均与实测值接近,式(28)计算的平均误差为 7.46%。在 92 组试验工况中,误差超过 10%的共有 22 组,其中 10%~15%的有 12 组,超过 20%的有 4 组,最

大误差为 28.1%。式(31)计算的平均误差为 7.75%,误差超过 10%的共有 30 组,其中 24 组数据误差均小于 15%,最大误差为 23.7%。

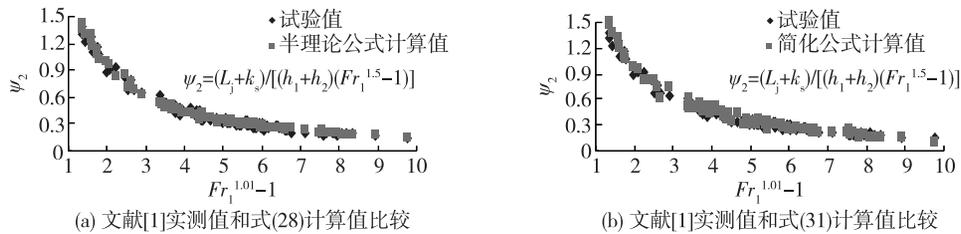


图 7 水跃长度的比较

Fig. 7 Comparison of hydraulic jump lengths

可见,本文提出的水跃旋滚长度与水跃长度的半理论公式和简化公式精度均较高,能很好反映水跃旋滚长度和水跃长度的实际情况,表明用水跃区水质点的运动方程研究水跃旋滚长度和水跃长度是可行的。分析认为因水跃区强烈紊动,使得水跃旋滚末端前后波动明显,施测困难造成公式计算值的局部偏离。

3 结 语

通过水跃区水质点的运动方程,理论研究密排加糙床面水跃旋滚长度和水跃长度的变化规律。研究表明,水跃区相对加速度参数 D 和 A 是跃前断面弗劳德数,水跃共轭水深比和当量粗糙高度的函数;水跃旋滚长度和水跃长度随着跃前断面弗劳德数、跃前断面水深和水跃共轭水深比的增大而增大,随着床面当量粗糙高度的增加而减小。水跃旋滚长度半理论计算式(19)计算的水跃旋滚长度在弗劳德数 2.1~9.89 范围内,平均误差为 6.60%;简化计算式(24)计算的平均误差为 7.4%。水跃长度半理论计算式(28)计算的水跃长度在弗劳德数 2.4~10.5 范围内,平均误差为 7.46%;简化计算式(31)计算的平均误差为 7.75%。

参 考 文 献:

- [1] HUGHES W C, ERNEST FLACK J. Hydraulic jump properties over a rough bed[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984, 110(12): 1755-1771.
- [2] EAD S A, RAJARATNAM N. Hydraulic jumps on corrugated beds[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(7): 656-663.
- [3] CAROLLO F G, FERRO V, PAMPALONE V. Hydraulic jumps on rough beds[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 133(9): 989-999.
- [4] ABBASPOUR A, DALIR A H, FARSAIDIZADEH D, et al. Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics[J]. Journal of Hydro-environmental Research, 2009(3): 109-117.
- [5] 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 depths and length of jump on corrugated beds of stilling basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(5): 120-127. (in Chinese))
- [6] 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 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))
- [7] 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))
- [8] 张志昌, 傅铭焕, 赵莹, 等. 人工粗糙壁面的水跃特性研究[J]. 应用力学学报, 2014, 31(2): 270-275. (ZHANG Zhi-chang, FU Ming-huan, ZHAO Ying, et al. Characteristics of hydraulic jump on artificial roughened beds[J]. Chinese Journal of

- Applied Mechanics, 2014, 31(2): 270-275. (in Chinese))
- [9] ARNDT R A, IPPEN A T. Rough surface effects on cavitation inception[J]. Journal Basic Engineering, 1968, 90(2): 249-261.
- [10] 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))
- [11] EAD S A, RAJARATNAM N. Plane turbulent wall jets on rough boundaries with limited tailwater[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(10): 1245-1250.
- [12] 詹明安, 周建国, 黄文政. 关于水跃跃长的计算[J]. 人民长江, 1990(3): 18-21. (ZHAN Ming-an, ZHOU Jian-guo, HUANG Wen-zheng. Calculation of length of hydraulic jump[J]. Yangtze River, 1990(3): 18-21. (in Chinese))
- [13] 吴宇峰, 伍超, 刘小兵. 渐扩散水跃跃长的研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 210-215. (WU Yu-feng, WU Chao, LIU Xiao-bing. Length of hydraulic jump in gradually broadened channel[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(2): 210-215. (in Chinese))
- [14] 张志昌, 赵莹, 傅铭焕. 矩形平底明渠水跃长度公式的分析与应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(11): 190-198. (ZHANG Zhi-chang, ZHAO Ying, FU Ming-huan. Analysis and application of rectangular flat-bottomed open channel hydraulic jump length formulas[J]. Journal of Northwest A & F University(Nat Sci Ed), 2014, 42(11): 190-198. (in Chinese))
- [15] 刘沛清. 矩形明渠水跃段速度分布的理论分析[J]. 水利学报, 1993(9): 48-54. (LIU Pei-qing. Theoretical analysis on rectangular open channel velocity distribution in hydraulic jump region[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993(9): 48-54. (in Chinese))

Length calculation of free hydraulic jump on rough bed of stilling basin

FU Ming-huan^{1,2}, ZHANG Zhi-chang²

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

Abstract: As the important parameters in designing the stilling basin, calculation of the length of the free hydraulic jump plays a major role in the safety, stability and economization for the stilling basin. The research on the variation laws of the vortex roll length of the free hydraulic jump and the hydraulic jump length occurred on the uniform rough height bed of the stilling basin was carried out according to establishing the motion equations for water body particle in the hydraulic jump zone, and developing a theoretical method for calculation of the vortex roll length of the free hydraulic jump and the hydraulic jump length, and the physical parameters are calibrated by the given expressions based on the testing data from the existing literatures. Research results show that both of the hydraulic jump vortex roll length and the hydraulic jump length on the uniform rough height bed of the stilling basin increase with the increase of the upstream Froude number, upstream supercritical water depth and the conjugate depth ratio, and at the same time decrease with the increase of the equivalent roughness of the riverbed. From the verification results it is found that the calculated values are well approximate to the measured values of the hydraulic jump vortex roll length and the hydraulic jump lengths.

Key words: uniform rough height beds; motion equations; hydraulic jump vortex roll length; length of hydraulic jump