

空间水跃共轭水深公式综合分析*

李占松 厉良辅

(郑州工学院水利及环境工程系)

摘 要: 本文首先导出了空间水跃一般共轭水深公式, 并由此导出了几个特例; 通过实验研究, 给出了收缩空间水跃共轭水深公式的具体形式; 最后, 讨论了空间水跃形态变化问题。

关键词: 空间水跃, 共轭水深, 收缩型

空间水跃可分为扩散型和收缩型。

以前国内外研究空间水跃的文献大多以扩散型为主, 并对跃前断面在突扩断面的临界状态建立了共轭水深公式, 如文献[1]、[4]、[3]。文献[1]列举了许多作者的研究成果, 并提出了新的公式。其研究成果基本能够满足工程需要。

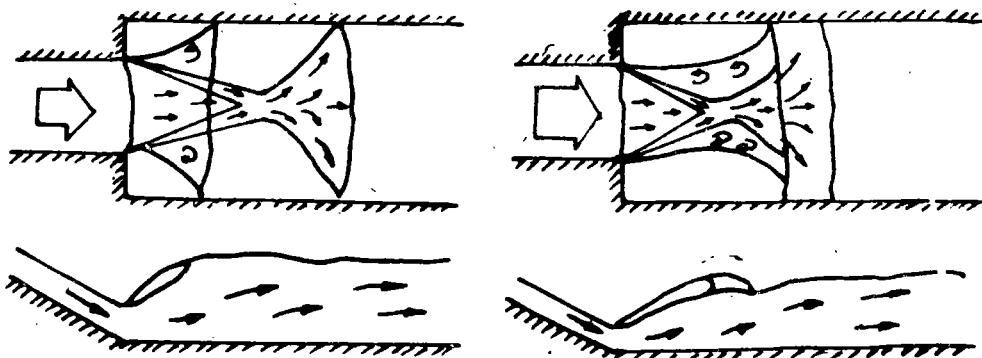


图 1

图 2

在平原闸闸下产生的空间水跃多属收缩型⁽²⁾。如图 1、2 所示。对于图 1 所示的情况, 跃后断面明显。然而, 在这个断面上水面横向变化较大。由于回流区的存在, 波动也较大, 并且其后主流单宽流量增大形成水面涌高。对于图 2 所示的情况, 典型跃后断面根本不存在, 主流收缩段上的跃体仅是完整跃体的一部分。综合这两种情况, 决定选取空间水跃末端起伏不大的断面(亦即单宽流量最大的断面之后主流扩散形成波状水跃的跃后断面)的水深为此空间水跃的一特征尺寸。从水跃的定义出发, 称此断面为空间水跃的跃后断面, 在此断面上游的水流断面上, 局部为缓流, 局部为急流。依此类推, 把此断面至跃

* 收稿日期: 1990.02.11

前断面的距离称为空间水跃的跃长。

1 一般共轭水深公式

突扩边界下空间水跃(包括扩散型和收缩型)的物理模型如图3所示。

1-1断面取在突扩断面, 2-2断面取在跃后断面。

1-1断面和2-2断面应用动量方程:

$$\rho Q \cdot (\alpha_{02} v_2 - \alpha_{01} v_1) = \sum F$$

$$\rho Q (\alpha_{02} \cdot \frac{Q}{K b_0 h_2} - \alpha_{01} \cdot \frac{Q}{b_0 h_1})$$

$$= \frac{1}{2} \gamma b_0 h_1^2 + \frac{1}{2} \gamma h_0^2 (B - b_0) - \frac{1}{2} \gamma B h_2^2 - F_r$$

其中: α_{01} , α_{02} —— 分别为1-1, 2-2

断面动量修正系数;

Q —— 流量; ρ —— 水的密度; γ —— 水的容重;

v_1 , v_2 —— 分别为1-1, 2-2断面主流流速;

h_0 —— 回流区水深(1-1断面);

h_1 , h_2 —— 分别为1-1, 2-2断面主流水深;

$K b_0$ —— 2-2断面主流宽度; b_0 —— 突扩前渠道宽度;

B —— 突扩后渠道宽度;

F_r —— 1-1, 2-2断面间总的底部阻力。

令 $\beta = B/b_0$, $\eta = h_2/h_1$, $\eta_0 = h_0/h_1$, 并考虑到 $Q = b_0 h_1 v_1$, 则上式可简化为:

$$\frac{1}{K} = \frac{\alpha_{01}}{\alpha_{02}} \eta + \frac{8h_2}{2\alpha_{02}v_1^2} [1 + \eta_0^2(\beta - 1) - \beta\eta^2 - \frac{2F_r}{\rho g b_0 h_1^2}]$$

一般情况下, $\alpha_{01}/\alpha_{02} \approx 1$, $\alpha_{01} \approx 1$, $\alpha_{02} \approx 1$, 并且有 $F_{r1} = \frac{v_1^2}{\sqrt{gh_1}}$, 则:

$$\frac{1}{K} = \eta \left\{ 1 + \frac{1}{2F_{r1}^2} [1 + \eta_0^2(\beta - 1) - \beta\eta^2 - \frac{2F_r}{\rho g b_0 h_1^2}] \right\} \quad (1)$$

关于 K 的意义, 简单地说: K 为2-2断面主流宽度与 b_0 之比; 严格地讲: 当 Q 、 h_2 一定时, 如果某一宽度上流速分布均匀时的动量与跃后断面实际动量相等, 那么就称这一宽度为该断面上的折合主流宽度, 其值与 b_0 之比即为 K 值。由此可知, K 值不能通过实验直接从跃后断面上测定。由(1)式可知, K 与 η 、 F_{r1} 、 η_0 、 β 、 $F_r/\rho g b_0 h_1^2$ 等量有关。

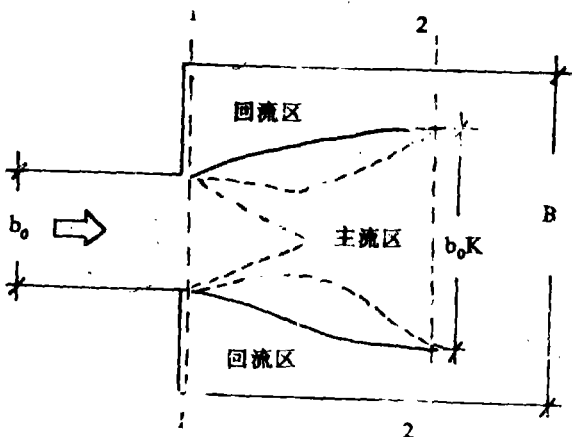


图 3

通常, 在水跃范围内 F_r 可以忽略, 那么(1)式简化为:

$$\frac{1}{K} = \eta \left\{ 1 + \frac{1}{2F_{r_1}^2} [1 + \eta_0^2(\beta - 1) - \beta\eta^2] \right\} \quad (2)$$

2 共轭水深公式的几个特例

2.1 $K = B/b_0$ 或 $1/K = b_0/B$

这相当于扩散型空间水跃后断面扩至下游渠道全断面的情况。

由(2)可得:

$$\frac{1}{\beta} = \eta \left\{ 1 + \frac{1}{2F_{r_1}^2} [1 + \eta_0^2(\beta - 1) - \beta\eta^2] \right\} \quad (3)$$

2.1.1 $\eta_0 = 0$ 即若回流区在 1-1 断面水深可认为等于零, 那么:

$$\frac{1}{\beta} = \eta \left\{ 1 + \frac{1}{2F_{r_1}^2} [1 - \beta\eta^2] \right\} \quad (3-1)$$

2.1.2 $\eta_0 = 1$ 即若回流区在 1-1 断面水深可认为等于该断面主流水深, 那么:

$$\frac{1}{\beta} = \eta \left\{ 1 + \frac{1}{2F_{r_1}^2} [1 - \eta^2]\beta \right\} \quad (3-2)$$

2.1.3 $\eta_0 = \eta$ 即若回流区在 1-1 断面可认为等于跃后水深, 那么:

$$\frac{1}{\beta} = \eta \left\{ 1 + \frac{1}{2F_{r_1}^2} [1 - \eta^2] \right\} \quad (3-3)$$

某些文献认为回流区水深在 1-1 断面上按曲线变化, 相当于 η_0 为 1 到 η 之间的某一值, 这里不再一一列出。

2.2 $\eta_0 = 0$ 即认为回流区水深在 1-1 断面等于零, 那么:

$$\frac{1}{K} = \eta \left\{ 1 + \frac{1}{2F_{r_1}^2} [1 - \beta\eta^2] \right\} \quad (4)$$

2.3 $\eta_0 = 1$ 即认为回流区水深在 1-1 断面等于主流水深, 那么:

$$\frac{1}{K} = \eta \left\{ 1 + \frac{1}{2F_{r_1}^2} [1 - \eta^2]\beta \right\} \quad (5)$$

2.4 $\eta_0 = \eta$ 即认为回流区水深在 1-1 断面等于跃后断面水深, 那么:

$$\frac{1}{K} = \eta \left\{ 1 + \frac{1}{2F_{r_1}^2} [1 - \eta^2] \right\} \quad (6)$$

$$\text{此式又可写成: } \eta^3 - (1 + 2F_{r_1}^2) \eta + \frac{2F_{r_1}^2}{K} = 0 \quad (6-1)$$

3 收缩型空间水跃共轭水深公式的实验研究

收缩型空间水跃即主流通过突扩断面后受到回流挤压的情形, 此时 $K < 1$ 。对于扩散型空间水跃已研究得比较成熟, 而消能不充分且易产生折冲水流的收缩型空间水跃却在文献中很少涉及。而这种水流现象在平原闸局部开启时是经常发生的。

我们在一平原闸实验模型上进行了研究。首先实测了几组不同 β 、 F_{r_1} 情况下的回流区水深 h_0 、跃后水深 h_2 如下: (单位: cm)

h_0	5.86	6.62	6.35	6.07	7.02	5.31	5.72	4.78	5.65	4.59	5.15	4.61	3.82	4.72
h_2	6.24	6.83	6.70	5.38	5.89	5.26	6.32	4.52	5.28	4.75	5.78	4.63	3.73	6.32

可以看出, 假定 $\eta_0 = \eta$ 成立, 那么, 就可以用(6-1)式来分析:

$$\eta^3 - (1 + 2F_{r_1}^2) \eta + \frac{2F_{r_1}^2}{K} = 0 \quad (6-2)$$

这里关键就是要确定系数 K 的变化规律。在水跃跃前断面发生在突扩断面处的临界情况下, 测定了不同 F_{r_1} 、 β 时的 η 值如下表所示。实验数据的范围为: $F_{r_1} = 3.5 \sim 6.2$; $\beta = 1/7 \sim 1/8$ 。

项	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
单位	/	cm	cm	cm	L/S	cm	m/S	/	/	/
序号	β	H_0	h_1	h_2	Q	b_1	v_1	η	F_{r_1}	$1/K$
1	0.167	13.58	1.50	4.95	5.79	20	1.93	3.30	5.03	2.66
2	0.733	20.57	1.42	6.05	19.57	88	1.57	4.27	4.21	2.20
3	0.525	22.03	2.07	6.73	23.75	63	1.82	3.25	4.04	2.30
4	0.792	21.89	1.46	6.53	23.33	95	1.68	4.46	4.44	2.32
5	0.667	20.57	1.47	5.72	19.57	80	1.67	3.91	4.40	2.47
6	0.608	23.30	2.06	6.48	27.79	73	1.84	3.14	4.10	2.31
7	0.417	19.77	2.01	6.02	17.48	50	1.74	3.00	3.92	2.22
8	0.158	13.40	1.44	4.38	5.555	19	1.04	3.05	5.43	2.75
9	0.400	18.90	1.40	4.85	15.37	48	2.29	3.46	6.17	2.96
10	0.167	13.80	1.68	4.62	6.08	20	1.81	2.75	4.46	2.30
11	0.442	20.15	1.25	5.42	18.45	53	2.78	4.36	7.93	3.74
12	0.300	15.80	1.23	4.16	9.12	36	2.05	3.37	5.91	2.87
13	0.083	11.60	2.26	4.65	3.55	10	1.57	2.06	3.33	1.76
14	0.446	19.35	2.23	5.83	16.44	53.5	1.38	2.61	2.95	1.77
15	0.167	13.22	1.67	5.38	5.32	20	1.59	3.22	3.94	2.19
16	0.667	21.48	1.42	6.12	22.11	90	1.73	4.31	4.64	2.55
17	0.438	16.85	1.31	5.38	11.01	52.5	1.60	4.11	4.47	2.48
18	0.179	15.61	2.24	5.80	8.80	21.5	1.83	2.59	3.91	2.11

注: (1) (1) = (6) + 120cm

(2) 三角堰零点读数为 2.45cm, 则水头为 $(H_0 - 2.45)$ cm.

从实验数据可以看出, 回流区的宽度对 K 值没有影响, 即 K 与 β 无关, 与分析结论相同. 由实验数据给出了 $K \sim F_{r1}$ 坐标上的点坐标, 如图 4 所示.

从图 4 可以看出, 实验数据与 $K = F_{r1}^{-0.6}$ 曲线符合很好. 因此, 得出经验公式:

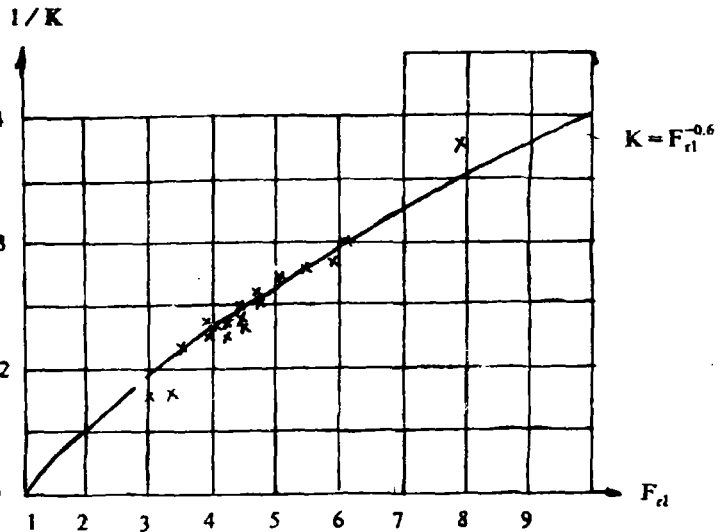
$$K = F_{r1}^{-0.6} \quad (7)$$

(7)式代入(6-1)式得:

$$\eta^3 - (1 + 2F_{r1}^2)\eta + 2F_{r1}^{-0.6} = 0 \quad (8)$$

上式即收缩型空间水跃公式的具体形式.

图 4



4 关于空间水跃型态变化问题

由于扩散型空间水跃与收缩型空间水跃流态明显的差别, 会给工程带来截然不同的效果, 因此弄清楚两者之间的转化条件是完全必要的.

对于临界情形, 即水跃在其发生前后主流宽度无变化, 那么由动量分析知必须存在这样的条件, 即主流两侧回流水深与主流水深相等. 由动量分析可知, 若回流水深大于主流, 则必然发生收缩型空间水跃. 这与在平原闸局部开启的模型实验中所观察到的水流现象相符. 可见, 分析回流水深的控制条件是确定空间水跃型态的关键.

若扩散型空间水跃的跃后断面达到突扩后全断面, 此时与回流接触的主流流动均为急流或含急流的水跃漩滚区. 由实验可知, 这种情况下无向回流提供流量的固定来源. 那么回流水深小于主流水深的条件自然满足.

如若渠道突扩比较大, 扩散型空间水跃的跃后断面未至渠道全断面, 则跃后有一段主流缓流扩散. 在这一段内, 使回流能够据此得以补充流量. 而在回流区内前段主流也携带走部分流量. 在恒定流状态下使之平衡, 得到回流区固定的统计水深. 在下游水深增加的情况下, 此水深若大于水跃初始断面水深, 扩散型空间水跃就转化成收缩型空间水跃.

5 结 论

5.1 本文得到了空间水跃一般共轭水深公式:

$$\frac{1}{K} = \eta \left\{ 1 + \frac{1}{2F_{\gamma_1}^2} \left[1 + \eta_0^2 (\beta - 1) - \beta \eta^2 - \frac{2F_{\gamma_1}}{\rho g b_0 h_1^2} \right] \right\}$$

并由此导出了几个特例。

5.2 通过实验研究, 收缩型空间水跃共轭水深公式的具体形式为:

$$\eta^3 - (1 + 2F_{\gamma_1}^2)\eta + 2F_{\gamma_1}^{-0.6} = 0$$

5.3 指出回流水深是决定空间水跃型态的关键, 而突扩比是影响回流水深的重要因素。

参 考 文 献

- (1) 郭子中. 消能防冲原理与水力设计. 水利出版社, 1980
- (2) 毛昶熙. 闸下消能初步综合研究. 1955年水工试验研究学术讨论选集(水工建筑物下游消能问题), 1956
- (3) 切尔托乌索夫. 水力学专门教程. 高等教育出版社, 1951
- (4) K.赫布拉德, J.瑞斯. 扩散型消力池的设计计算. 第十二届大坝国际会议报告, 1982

The Comprehension and Analysis of Conjugate Height Equations for Spatial Hydraulic Jump

Li Zhangsong Li Liangfu
(ZhengZhou Institute of Technology)

Abstract: A general equation for spatial hydraulic jump height has been derived firstly in present paper, and several formulae under some particular conditions have been obtained successively. For spatial jump of convergent type, a concrete form of conjugate research. Some patterns spatial jump have been discussed finally.

Keywords: spatial hydraulic jump, conjugate height, convergent type