

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.06.031

# 侧堰长度变化对直角折线堰过流能力影响研究

李庆梅, 邱 勇, 王尚今, 张家鼎, 杨 坤

(云南农业大学 水利学院, 云南 昆明 650201)

**摘要:** 通过水工模型试验研究, 得到了不同侧堰长度下的直角折线堰过流能力: 一定水头条件下, 直角折线堰过流能力大于 WES 实用堰, 但侧堰长度从 75.0 mm 增加到 112.5 mm、150.0 mm 和 187.5 mm 时, 其过流能力的增幅呈下降趋势(堰顶水头 100 mm 时, 其增幅依次下降为 5.98%、2.85% 和 1.36%)。在试验研究成果基础上, 基于堰流基本公式, 对其流量系数进行回归分析, 并将拟合公式进行工程应用, 成果表明: 流量系数拟合公式经过几何比尺放大后可用于指导实际工程设计。

**关键词:** 拟合分析; 过流能力; 侧堰长度; 直角折线堰; 亲水设施

中图分类号: TV651.1

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)06—0177—05

## Influence of Side Weir Length Change on Flow Capacity of Right Angle Folded Line Weir

LI Qingmei, QIU Yong, WANG Shangjin, ZHANG Jiading, YANG Kun

(College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China)

**Abstract:** Through the hydraulic model test, the flow capacity of the right angled folded line weir under different side weir lengths is calculated under certain water head conditions, the flow capacity of the right angled folded line weir is greater than that of the WES practical weir, but when the length of the side weir increases from 75mm to 112.5mm, 150.0 mm and 187.5mm, the increase of the flow capacity shows a downward trend (when the weir top water head is 100 mm, the increase in turn decreases to 5.98%, 2.85% and 1.36%). On the basis of the test research results, based on the basic formula of weir flow, the regression analysis of flow coefficient is carried out, and the fitting formula is applied in engineering. The results show that the fitting formula of flow coefficient can be used to guide the actual engineering design after being magnified by geometric scale.

**Keywords:** fitting analysis; overflow capacity; length of side weir; right angle folded line weir; hydrophilic facility

堰是水利工程中常见的挡水、泄水建筑物, 广泛应用于河道、水闸、溢洪道等水利工程中<sup>[1-2]</sup>。而直角折线堰是一种能有效提高泄水建筑物过流能力的新型堰, 该堰由前堰、侧堰和后堰组成, 其不仅具有结构简单、造价低廉和施工方便等特点<sup>[3]</sup>, 而且堰型优美, 溢流效果美观, 可与自然环境融为一体, 实现水利工程的观赏性, 能够很好地应用于农村生态河道治理<sup>[4]</sup>。

对于直角折线堰过流能力的计算, 现有文献资

料, 仅针对前堰长度等于侧堰长度( $a = b$ )情况下的直角折线堰给出了流量系数估算的经验公式: 文献[2]通过水工模型试验, 分析影响 Z 形薄壁堰过流能力的因素, 给出了一定堰高下、河渠宽度不变, 侧堰平行于河道轴线的直角折线堰流量系数公式; 文献[5]基于试验研究, 通过对 Z 型堰水流流态、水面线及下游流速场等水流特性的描述, 分别采用量纲分析法和统计分析方法给出了流量计算公式。

收稿日期: 2019-08-09

修稿日期: 2019-09-13

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目(201810676004)

作者简介: 李庆梅(1996—), 女, 云南昌宁人, 本科生, 所学专业为工程水力学。E-mail: 1789495821@qq.com

通讯作者: 邱 勇(1971—), 男, 云南会泽人, 教授, 硕士生导师, 主要从事工程水力学方面的教学与科研工作。

E-mail: 13108854817@126.com

## 1 试验设计

直角折线堰由垂直于河道的前堰  $a$ 、后堰  $c$  和平行于河道的侧堰  $b$  组成。试验研究采用有机玻璃水槽<sup>[6]</sup>；河道宽  $w$  为 150.0 mm，堰体厚度  $d$  为 10.0 mm，固定前堰、后堰长度不变，均为 75.0 mm ( $w = a + c$ )，详见图 1。

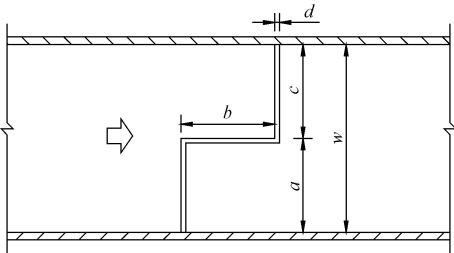


图 1 直角折线堰平面布置图

试验选定堰高  $P = 100.0$  mm，选择三种不同的侧堰长度进行研究，分别为方案 1 ( $b = 75.0$  mm)、方案 2 ( $b = 112.5$  mm)、方案 3 ( $b = 150.0$  mm)，详见表 1。

表 1 不同试验方案体型尺寸

方案	前堰 $a$ /mm	侧堰 $b$ /mm	后堰 $c$ /mm	单宽 $w$ /mm	展长 $L$ /mm
方案 1	75.0	75.0	75.0	150.0	225.0
方案 2	75.0	112.5	75.0	150.0	262.5
方案 3	75.0	150.0	75.0	150.0	300.0

## 2 试验研究成果

文献[7]已给出相同堰宽 ( $w = 150.0$  mm)、一定堰高 ( $P = 100.0$  mm) 条件下 WES 实用堰的过流能力。通过水工模型试验，对直角折线堰进行过流能力测试，得到不同试验方案的过流能力，将其与 WES 实用堰进行比较 (见表 2)。

表 2 WES 实用堰和不同直角折线堰试验方案过流能力比较

水头 $H$ /mm	流量 $Q/(10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$			
	WES 实用堰	方案 1	方案 2	方案 3
20	0.64	1.45	1.56	1.67
40	1.71	3.06	3.30	3.47
60	3.38	4.97	5.34	5.55
80	5.70	7.18	7.67	7.91
100	8.41	9.62	10.20	10.49
120	11.39	12.22	12.96	13.22
140	14.71	14.99	15.81	16.10
160	18.00	17.93	18.80	19.13
180	21.16	21.03	21.97	22.34

由表 2 可以发现：当水头不超过 160 mm 时，直角折线堰过流能力均大于 WES 实用堰，但堰顶水头超过 160 mm 时，方案 1 ( $b = 75.0$  mm) 的过流能力小于 WES 实用堰。表明直角折线堰在堰顶水头不超过 1.6 倍堰高情况下的低水头时泄流优势较为明显。

此外，侧堰长度  $b$  的增加，能够增大直角折线堰过流能力，但增幅呈下降趋势：相对于方案 1，方案 2 过流能力增加的最大幅度可达 8.05%，但相同水头 ( $H = 40$  mm) 情况下，方案 3 相对于方案 2 的增幅仅有 5.08%；堰顶水头 180 mm 时，方案 2 过流能力的增幅为 4.47%，而方案 3 相对于方案 2 的增幅仅有 1.66%。

## 3 过流能力公式拟合

### 3.1 流量系数公式拟合

影响直角折线堰过流能力的主要因素包括直角折线堰展长  $L$  ( $L = a + b + c$ ) 和堰顶水头  $H$ 。不考虑溢流前缘长度随水头变化的情况，将河渠过流宽度视为定值，通过堰流基本公式<sup>[8-9]</sup> 计算不同试验方案直角折线堰流量系数 (见表 3)：

表 3 不同试验方案流量系数

水头 $H$ /m	流量系数 $m_m$		
	方案 1	方案 2	方案 3
0.02	0.7709	0.8311	0.7143
0.04	0.5752	0.6215	0.6531
0.06	0.5088	0.5467	0.5684
0.08	0.4776	0.5107	0.5265
0.10	0.4581	0.4855	0.4994
0.12	0.4426	0.4695	0.4789
0.14	0.4308	0.4544	0.4627
0.16	0.4218	0.4422	0.4501
0.18	0.4147	0.4332	0.4404

$$Q_m = m_m w_m \sqrt{2gH_m^{1.5}} \quad (1)$$

式中： $Q_m$  为模型流量， $10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ ； $w_m$  为模型过流宽度，m； $H_m$  为模型堰顶水头，m； $m_m$  为模型流量系数。

对表 3 所得不同试验方案下的流量系数和相对应的堰顶水头进行回归分析<sup>[10-11]</sup> (见图 2)。

根据  $H_m$  和  $m_m$  的测点分布，可以采用抛物线函数和指数函数对其进行描述。抛物线形式简单，但相关性稍差；而指数函数形式尽管较为复杂，但精度能够满足要求。综合比较，采用指数函数对  $H_m$  和  $m_m$  进行拟合分析，得到其拟合结果：

$$m_m = A_1 e^{(-H_m/t_1)} + A_2 e^{(-H_m/t_2)} + A_0 \quad (2)$$

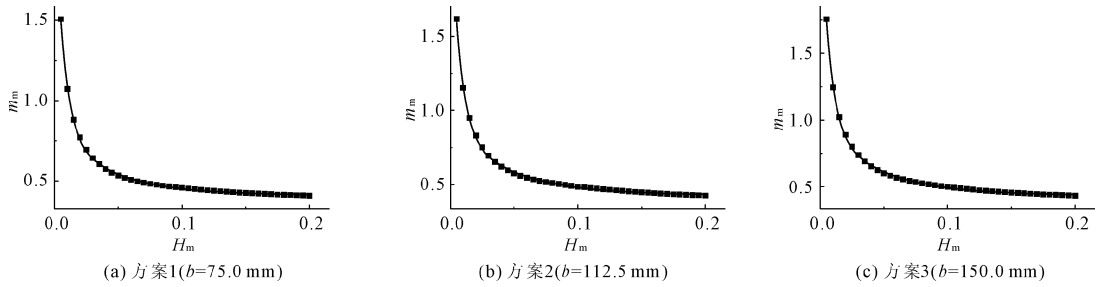


图2 不同试验方案  $m_m - H_m$  回归分析

表4 流量系数  $m_m$  和堰顶水头  $H_m$  拟合分析参数表

方案	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$t_1$	$t_2$	相关性系数
方案1 ( $b=75.0$ mm)	0.41195	1.47184	0.42018	0.00694	0.04272	0.9991
方案2 ( $b=112.5$ mm)	0.42747	1.57741	0.45895	0.00698	0.04672	0.9991
方案3 ( $b=150.0$ mm)	0.43465	1.72380	0.53392	0.00691	0.04519	0.9991

根据表4得,得到不同方案的流量系数  $m_m$  和堰顶水头  $H_m$  的拟合结果:

$$m_m = 1.47184e^{(-H_m/0.00694)} + 0.42018e^{(-H_m/0.04272)} + 0.41195 \quad (3)$$

$$m_m = 1.57741e^{(-H_m/0.00698)} + 0.45895e^{(-H_m/0.04672)} + 0.42747 \quad (4)$$

$$m_m = 1.72380e^{(-H_m/0.00691)} + 0.53392e^{(-H_m/0.04519)} + 0.43465 \quad (5)$$

### 3.2 拟合公式参数分析

由式(3)、式(4)、式(5)可以看出,不同试验方案的公式拟合结果存在差异性,未能很好的反映侧堰  $b$  长度的变化对流量系数的影响。因此,在此基础上,分别选择指数函数和抛物线方程对表4所列参数  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_0$  以及  $t_1$ 、 $t_2$  和侧堰长度  $b$  进行拟合分析<sup>[12]</sup>(见图3、图4)。

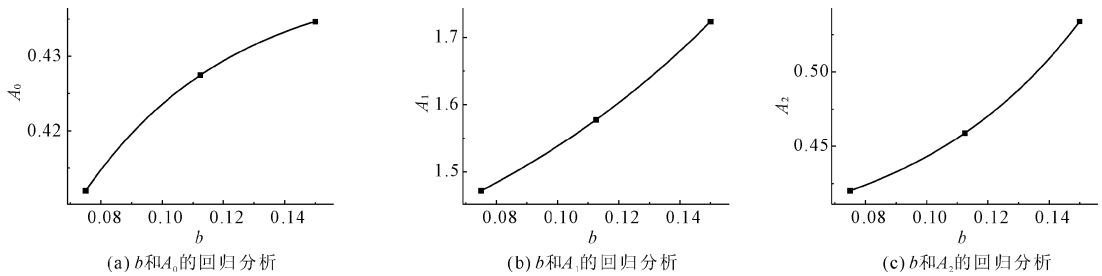


图3  $b$  与  $A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$  回归分析

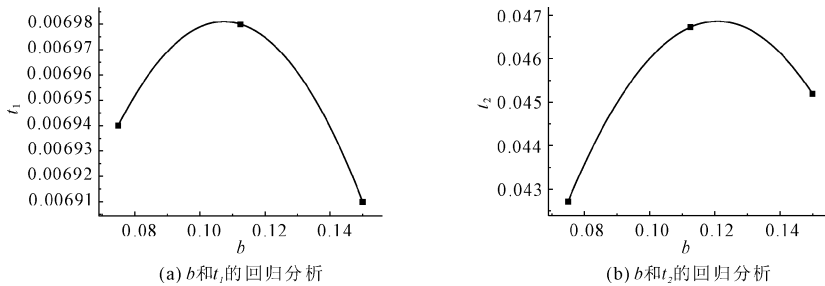


图4  $b$  与  $t_1$ 、 $t_2$  回归分析

观察图3,  $b$  与  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_0$  拟合结果良好,回归分析成果见表5。

观察图4,  $b$  与  $t_1$ 、 $t_2$  拟合结果较好,回归分析成果见表6。

表5  $b$  与  $A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$  拟合分析参数表

关系	拟合函数	$C_1$	$D_1$	$E_0$	相关性
$b - A_0$		-0.13494	0.04865	0.44083	1
$b - A_1$	$A = C_1 e^{-b/D_1} + E_0$	0.14199	-0.11471	1.19881	1
$b - A_2$		0.01110	-0.05687	0.37866	1

表 6  $b$  与  $t_1$ 、 $t_2$  回归分析参数表

关系	拟合函数	$C$	$B_1$	$B_2$	相关性
$b-t_1$	$t = C + B_1 b + B_2 b^2$	0.00653	0.00840	-0.03911	1
$b-t_2$		0.01813	0.47533	-1.96622	1

根据表 5 和表 6 可得,  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $y_0$  与  $b$  成指数关系,  $t_1$ 、 $t_2$  与  $b$  存在二次抛物线关系, 其表达式如下:

$$A_0 = -0.13494e^{(-b/0.04865)} + 0.44083 \quad (6)$$

$$A_1 = 0.14199e^{(b/0.11471)} + 1.19881 \quad (7)$$

$$A_2 = 0.01110e^{(b/0.05687)} + 0.37866 \quad (8)$$

$$t_1 = 0.00653 + 0.00840b - 0.03911b^2 \quad (9)$$

$$t_2 = 0.01813 + 0.47533b - 1.96622b^2 \quad (10)$$

根据式(2)、式(6)一式(10), 模型流量试验系

表 7 流量拟合计算成果(侧堰长度  $b = 187.5$  mm)

堰顶水头 $H$ /mm	20	40	60	80	100	120	140	160	180
拟合值 $Q/(10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	1.75	3.58	5.67	8.06	10.63	13.40	16.29	19.31	22.49
试验值 $Q/(10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	1.76	3.62	5.65	7.83	10.23	12.90	15.84	19.05	22.52
误差/%	-0.87	-1.00	0.35	2.84	3.74	3.73	2.77	1.37	-0.13

从表 8 可以看出: 拟合公式计算得到的直角折线堰过流能力和试验研究成果相比, 相对误差<sup>[14]</sup>(以试验值为基准)介于 -1.00% 到 3.74% 之间, 最大仅为 3.74%, 表明数学回归拟合分析所得到的流量系数计算公式可用。

此外, 侧堰长度  $b = 187.5$  mm, 堰顶水头为 100.0 mm(1 倍堰高)时, 其过流能力较方案 3( $b = 150.0$  mm)增幅为 1.36%; 堰顶水头增大到 180 mm, 其过流能力较方案三增幅下降为 0.68%。表明直角折线堰侧堰长度的增加, 对过流能力的贡献已经不大。

### 3.3.2 工程应用

将模型试验成果按照几何比尺放大<sup>[15-16]</sup>( $\lambda = 20$ )后得到的流量和水头, 采用上述相同的思路和方法进行数学回归分析, 其结果与模型数据回归拟合公式计算成果存在差异:  $A_{0p}$ 、 $A_{1p}$ 、 $A_{2p}$  和  $A_0$ 、 $A_1$ 、 $A_2$  的数值没有变化, 但是  $t_{1p}$ 、 $t_{2p}$  分别是  $t_1$ 、 $t_2$  的 20 倍, 其原因在于参与拟合的侧堰长度  $b$  存在几何比尺放大效应。故工程应用时, 需要对基于模型数据的流量系数拟合公式中的  $t_1$ 、 $t_2$  进行相应的几何比尺放大:

$$m_p = A_1 e^{(-H_p/t_{1p})} + A_2 e^{(-H_p/t_{2p})} + A_0 \quad (13)$$

其中:

$$t_{1p} = 0.00653\lambda + 0.00840b_p - \frac{1}{\lambda}0.03911b_p^2 \quad (14)$$

$$t_{2p} = 0.01813\lambda + 0.475330b_p - \frac{1}{\lambda}1.96622b_p^2 \quad (15)$$

数  $m_m$  可以表达为:

$$m_m = A_1 e^{(-H_m/t_1)} + A_2 e^{(-H_m/t_2)} + A_0 \quad (11)$$

将表达式(11) 带入公式(1) 得, 直角折线堰的过流能力拟合公式:

$$Q_m = (A_1 e^{(-H_m/t_1)} + A_2 e^{(-H_m/t_2)} + A_0)w_m \sqrt{2gH_m}^{1.5} \quad (12)$$

## 3.3 工程应用

### 3.3.1 公式验证

将拟合得到的公式(12), 计算一定堰高( $P = 100.0$  mm), 相同河渠宽度, 侧堰长度  $b = 187.5$  mm 时的过流能力, 将其和试验测试所得结果进行比较<sup>[13]</sup>, 详见表 7。

式中:  $\lambda$  为流量系数比尺;  $H_p$  为几何比尺放大后的原型水头,  $m$ ;  $b_p$  为几何比尺放大后的侧堰长度,  $m$ 。

根据表达式(13) 以及式(6)、式(7)、式(8)、式(14) 和式(15), 可以得到几何比尺放大后的流量系数计算公式, 进而得到可用于实际工程的过流能力计算公式:

$$Q_p = (A_{1p} e^{(-H_p/t_{1p})} + A_{2p} e^{(-H_p/t_{2p})} + A_{0p})w \sqrt{2gH_p}^{1.5} \quad (16)$$

## 4 结 语

对于生态河道中的直角折线堰, 其过流能力大小直接影响防洪安全。当侧堰布置在河道中部时, 直角折线堰的过流能力随侧堰长度增加而增加, 但流量的增幅呈下降趋势: 堰顶水头 180 mm 时, 侧堰长度由 75.0 mm(方案 1) 增加到 112.5 mm(方案 2)、150.0 mm(方案 3) 和 187.5 mm(方案 4), 其过流能力增幅由 4.47% 逐渐下降到 1.66%、0.68%。故可以认为: 单纯增加侧堰长度, 并不能很有效地提高其过流能力。

基于试验研究成果, 对流量系数进行拟合分析, 得到几何比尺放大后的直角折线堰泄流计算拟合公式, 其精度能满足工程应用要求, 可用于指导实际工程设计。

参考文献:

- [1] 赵伟伟,李英.折线型实用堰流量系数试验研究[J].陕西水利,2019(2):14-15,21.
- [2] 张靖,常倩,张庆华,等.Z形薄壁堰过流能力试验[J].水利水电科技进展,2017,37(6):38-43.
- [3] 张靖,翟兴涛,苗润泽,等.折线型实用堰流量系数实验研究[J].山东农业大学学报(自然科学版),2010,41(3):469-473.
- [4] 张英.基于耦合模型的水生态环境与区域经济协同发展研究[J].水利与建筑工程学报,2019,17(4):223-228.
- [5] 常倩.齿型堰与Z型堰水流特性实验研究[D].泰安:山东农业大学,2017:8-14.
- [6] 简鸿福,吕辉,唐波华,等.军民水库溢洪道堰面水动力特性试验研究[J].水利与建筑工程学报,2018,16(5):213-218.
- [7] 赵洪梅,邱勇,马希华,等.W型迷宫堰过流能力试验研究[J].人民珠江,2017,38(2):23-26.
- [8] 吴持恭.水力学[M].5版.北京:高等教育出版社,2016:306-315.
- [9] 水利部水利水电规划设计总院.水工设计手册[M].2版.北京:中国水利水电出版社,2011.
- [10] 杨升,李晓庆,高强,等.Ⅱ型折线型实用堰流量系数计算方法[J].长江科学院院报,2019,36(7):61-63,69.
- [11] 陈月君,顾晓峰,傅宗甫,等.上游边坡系数对折线型实用堰流量系数的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(5):425-432.
- [12] 马希华,邱勇,罗鹏,等.W型迷宫堰过流能力回归分析[J].水利规划与设计,2017(4):69-72.
- [13] 马欣,邱勇,焦萱,等.峡谷型水库溢洪道迷宫堰过流能力数值模拟[J].水电能源科学,2018,36(9):107-109,166.
- [14] 李稳坐,邱勇,尹韬,等.基于堰流基本公式的W型迷宫堰过流能力拟合分析[J].人民珠江,2017,38(7):69-72.
- [15] 李鑫,邱勇,阮合春,等.跌坎深度对扩散式泄槽底流消能水力特性影响试验研究[J].人民珠江,2019,40(8):50-56.
- [16] 李宗坤,张亚东,张钊.迷宫堰过流能力数值模拟[J].水利与建筑工程学报,2014,12(1):179-181,187.

(上接第122页)

(3) 当来水流量相同,消能防冲槽内抛填均匀粒径卵石时,抛石粒径与消能效果成反比。所以,抛填均匀粒径的卵石,其粒径不易过大。

#### 参考文献:

- [1] 新疆维吾尔自治区水利厅.新疆维吾尔自治区水资源公报[R].乌鲁木齐:新疆维吾尔自治区水利厅,2016.
- [2] 李锡龄.新疆引水渠首[M].乌鲁木齐:新疆人民出版社,1994:102,106,113,127,150.
- [3] 赵新伟.塔里木河帕满水库引水改造工程设计要点的理解[J].珠江水运,2019(9):72-73.
- [4] 徐自立,南晓红,梁宗祥.非岩基水闸泄洪消能和冲沙试验研究[J].人民黄河,2010,32(1):66-68.
- [5] 赖勇,黄荣卫,张永进.三溪口河床式水电站工程特点与新技术应用[J].水利与建筑工程学报,2014,12(6):54-58.
- [6] 张怀占,王建,刘道文.白河二级橡胶坝水毁工程成因分析及对策[J].河南水利,2003(5):106.
- [7] 吴建军,赵宇,耿莉.小浪底工程消力塘防冲槽设计[J].华北水利水电学院学报,2002,23(2):28-31.
- [8] 叶柳玲.阳西县陇西水闸消能防冲设计[J].中国水运,2016,16(7):176-178.
- [9] 赖勇,黄荣卫,张永进.浙江省山区水利水电枢纽工程水闸消能防冲新技术[J].水利水电科技进展,2012,32(5):78-81,85.
- [10] 李江峰,尹辉,耿凡坤,等.抛填不同粒径卵石对闸后防冲槽的影响研究水工模型试验研究报告[R].新疆乌鲁木齐:新疆水利水电科学研究院,2018:4-4.
- [11] 李新贤,周品,林亚.新疆维吾尔自治区水功能区划[M].新疆乌鲁木齐:新疆维吾尔自治区水利厅,2007:14-14.
- [12] 王琤浩.泥沙起动流速研究现状分析[J].科技创新导报,2014(7):32-36.
- [13] 李江峰,尹辉,戚印鑫,等.抛填粒径对防冲槽结构和冲刷的影响研究[J].水利与建筑工程学报,2019,17(3):115-120.
- [14] 李最森,唐洪武,戴文鸿.透水四面体框架群防护特性及其与抛石防护的对比研究[J].泥沙研究,2011(6):77-82.
- [15] 梁发云,彭君,杨昕.桥墩基础局部冲刷抛石防护性能波流水槽试验研究[J].结构工程师,2017,33(1):164-170.