

泄洪雾化降雨模型相似性探讨

周 辉, 吴时强, 陈惠玲

(南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 泄洪雾化影响的研究和预测目前仍然以大比尺模型试验研究为主, 但模型缩尺效应是制约这一方法准确预报泄洪雾化影响范围及程度的关键因素。根据乌江渡水电站泄洪雾化原型观测资料, 通过系列模型试验研究, 分析了水流 Re 和 We 数对泄洪雾化降雨强度的影响, 对泄洪雾化雨强的模型试验值与原型观测结果之间的相似关系进行了探索, 研究了雾化降雨影响区域的不同比尺模型试验测试结果之间的几何相似性。

关 键 词: 雾化降雨; 缩尺效应; 物理模型试验; 乌江渡水电站

中图分类号: TV135.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2009)01-0058-05

泄洪雾化是指水电工程泄水建筑物泄流过程中所产生的降雨和雾流现象。泄洪雾化的影响包括雾化降雨的影响和雾流的影响, 原型观测结果表明^[1,2]: 泄洪雾化的影响主要表现为雾化降雨的影响。

泄洪雾化的研究方法主要包括物理模型试验、数值模拟计算以及原型观测资料反馈分析。因泄洪雾化现象复杂, 影响因素众多, 雾化的形成机理尚不清楚。目前, 数学模型还不能完整模拟泄洪雾化现象, 虽然数值计算方法简捷、方便和节省, 但其准确性和可靠性满足不了实际工程应用要求。原型观测是研究泄洪雾化问题的重要手段, 但原型观测工作难度大; 在常规水力学模型试验中, 模型缩尺效应的影响明显, 模型难以预演泄洪雾化现象。因此, 针对泄洪雾化影响的研究和预测, 通常采用大比尺物理模型试验、数值模拟计算和工程类比分析相结合的研究方法。

在大比尺物理模型试验中, 仍然存在模型缩尺效应问题^[3,4]。目前, 对泄洪雾化模型试验的相似条件以及模型试验成果引伸到原体的规律等尚缺乏系统研究。因此, 依据乌江渡水电站泄洪雾化原型观测资料^[5], 进行了系列模型(4个不同比尺)试验研究, 探索泄洪雾化雨强的模型试验值与原型观测结果之间的相似关系, 论证了雾化降雨影响区域的几何相似性。

1 模型设计和试验系列布置

1.1 乌江渡水电站概况

乌江渡水电站最大坝高 165.0 m。水电站所在河道两岸陡峻, 河床狭窄, 枯水期水面宽度约 70.0 m, 均采用挑流泄洪消能方式; 其中, 中间 4 个溢流孔进口高程为 742.00 m, 出口高程为 675.134 m, 采用厂前挑流消能方式; 两侧边孔为滑雪道式。左岸和右岸各设一条泄洪洞, 进口高程均为 720.00 m, 用 9.0 m × 10.0 m 弧形闸门控制, 右岸泄洪洞出口高程为 697.73 m, 左岸泄洪洞出口高程为 665.55 m。枢纽布置见图 1。

1982 年, 中南勘测设计院组织有关单位对乌江渡水电站枢纽泄洪雾化进行了原型观测^[5], 沿坝下两岸公路共布置了 9 个雨量观测站, 测点位置如图 1 所示。

收稿日期: 2007-11-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50579084); 雅砻江水电开发联合基金资助项目

作者简介: 周 辉(1966-), 男, 湖北钟祥人, 高级工程师, 主要从事水工水力学研究。E-mail: hzhou@nhri.cn

1.2 试验系统选择及其布置

根据原型观测资料及其观测水力条件,选取右岸泄洪洞,2#孔和左岸泄洪洞的不同运行组合情况进行系列模型试验,试验系统布置如图 2 所示。

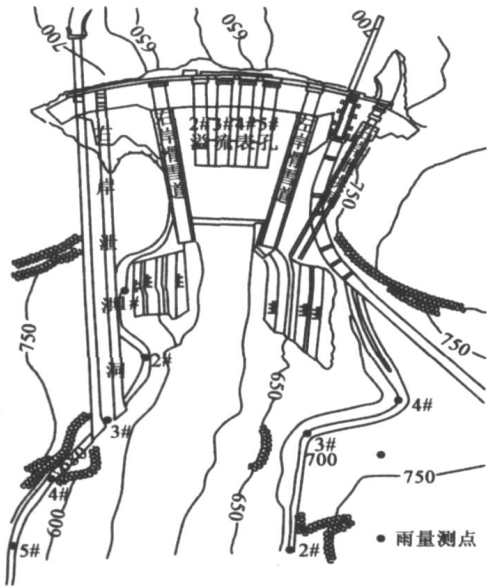


图 1 乌江渡水电站布置示意图

Fig. 1 Schematic of the arrangement of Wujiangdu hydropower station

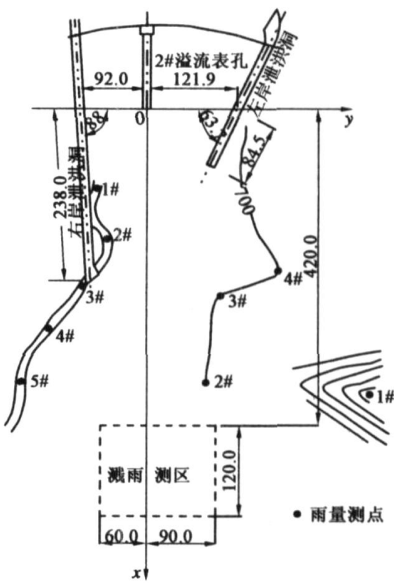


图 2 试验系统布置图(单位:m)

Fig. 2 Layout of test system

为了研究泄洪雾化模型试验相似性,拟定 4 个模型比尺为 $L_r = 35$ 、60、80 和 100,分别进行泄洪雾化试验研究。除了量测上述 9 个测点处的雨量外,试验中还在两个不同高程的平面上布置了测区,对溅雨影响范围及雨强进行量测,当模型比尺 $L_r = 35$ 时,溅雨影响范围相当大,受试验条件限制,仅量测了其中部分区域,测区布置如图 2 所示,测区高程分别为 671.04 m 和 684.24 m。

1.3 试验组次安排和水力条件控制

根据原型观测泄洪条件,拟定试验组次见表 1,同时给出了原型观测结果。试验过程中利用控制段控制出口流速,下游量水堰控制流量,保证系列模型试验的水力条件相似。雾化雨强采用称重法测量。

表 1 原观测试组次安排

Table 1 Arrangement of test group order

组次	泄水建筑物	库水位 / m	泄流量 / (m ³ · s ⁻¹)	下游水位 / m	右岸雨量 / (mm · h ⁻¹)			左岸雨量 / (mm · h ⁻¹)
					3 #	4 #	5 #	2 #
1	2 # 溢流孔	760.31	3944	640	68.8	155.2		71.4
2	左洞(75%)、右洞	760.17	3250	640	53.4	156.0		
3	右洞左洞(80%)	760.53	3940	640			93.5	63.7

2 试验结果分析

2.1 测点处雨强观测成果及相似性分析

与原型观测资料相对应,在各比尺模型中均布设雨量测点,试验结果与原型观测结果比较见表 2。

表 2 原型观测与模型试验结果

Table 2 Prototype observation and test results of model

组 次	比 尺	右岸雨量/(mm·h ⁻¹)			
		2 #	3 #	4 #	5 #
1	原型		68.8	155.2	
	35	0.401	0.230	0.545	0.115
	60	1.70	0.150	0.170	0.061
	80	2.73	0.086	0.078	0.044
	100	0.66	0.060	0.026	0.010
2	原型		53.4	156.0	
	35		1.663	0.680	0.525
	60	0.074	0.704	0.249	0.218
	80	0.049	0.083	0.088	0.055
	100	0.021	0.029	0.042	0.013
3	原型			105.3	93.5
	35		0.764	0.404	0.155
	60	0.071	0.095	0.192	0.118
	80	0.218	0.177	0.083	0.109
	100	0.060	0.036	0.042	0.037

虽然原型观测在两岸布设了 9 个观测点, 但能够测量到雨量的测站主要是右岸的 3 #、4 #、5 # 和左岸的 2 # 测点, 但在模型试验中左岸测点由于位置较高, 雨量较小, 几乎测不到降雨, 而右岸 2 # 测点处, 受水舌扩散抛洒影响, 雨量值可以观测到, 但不规则, 因此选取右岸 3 # 测点和 4 # 测点处观测成果进行分析, 雨量值与相应的模型比尺 L_r 之间的关系如图 3 所示, 其中 S_0 表示原型观测值。

由图 3 可见, 除组次 2 的 3 # 点外, 其他组次的 $S/S_0 \sim 1/L_r$ 关系曲线规律性较好, 在 $L_r = 60$ 以后基本一致, 而且在 $L_r = 60$ 处出现明显的转折点。若以此为分界点, 分段对曲线拟合, 选取函数形式 ($k > 0$), 分析可得

(1) $1 \leq L_r \leq 60$, 很明显, 当 $L_r = 1$ 时, $S = S_0$, 那么 $C = S_0$, 根据表 2, 求出右岸 4 # 点在 3 种不同运行组合情况下的 k , 取平均值, $k = 1.53$, 代入上式, $S = S_0 L_r^{-1.53}$ 。

(2) $60 < L_r \leq 100$, 同样, 可得到 $S = 2211.58 S_0 L_r^{-3.40}$

综合上述分析, 可以给出在本试验条件下的模型溅雨强度 ~ 原型溅雨强度之间的关系为

$$\begin{cases} S = S_0 L_r^{-1.53} & 1 \leq L_r \leq 60 \\ S = 2211.58 S_0 L_r^{-3.40} & 60 < L_r \leq 100 \end{cases} \quad (1)$$

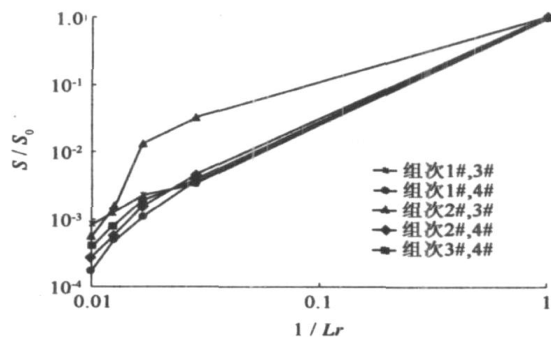
图 3 雨量值与相应的模型比尺 L_r 之间的关系

Fig. 3 Relations between rainfall value and corresponding model scale L_r

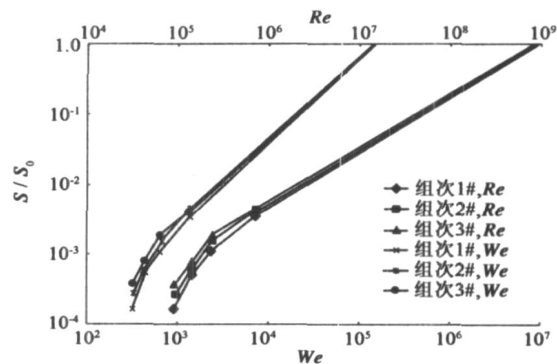
图 4 $S/S_0 \sim Re$, $S/S_0 \sim We$ 关系曲线

Fig. 4 Relation curve for S/S_0 and Re , and S/S_0 and We

2.2 韦伯数和雷诺数引起的雨强缩尺效应分析

根据量纲分析结果, 选取 $We = (\rho R V^2 / \sigma)^{0.5}$, 这里 ρ 为水流密度, 20 情况下为 1000 kg/m^3 ; V 为水舌流

速; σ 为水流与空气界面间张力系数, 取 0.0725 N/m ; R 为曲率半径, 一般取为挑流水舌水流表面曲率半径。分别计算各模型比尺试验条件下的韦伯数和雷诺数, 可以得到 $S/S_0 \sim Re$, $S/S_0 \sim We$ 关系曲线, 如图 4 所示。

当模型比尺较小时, We 和 Re 的值相对较小, 关系曲线变化率大, 说明在小比尺情况下, We 和 Re 变化对雨强影响大, 在较大的模型比尺情况下, 相应的模型流速和流量也较大, 对应的 We 和 Re 数也大, 关系曲线变化逐渐减缓, 表明表面张力和粘滞力影响也相对减小。

比较 $S/S_0 \sim We$ 和 $S/S_0 \sim 1/Lr$ 关系可以看出, $S/S_0 \sim We$ 关系曲线也可以相应分为两段, 分界点处 $We = 655$, We 小于 655 时, 表面张力影响显著, We 大于 655, 表面张力影响减小。

2.3 降雨影响范围的几何相似性分析

受乌江渡水电站泄洪洞鼻坎形式的影响, 雨区分布并不对称, 针对 4 个比尺的试验结果相似性进行分析。

采用 S_{35} , S_{60} , S_{80} , S_{100} 分别表示各比尺模型试验的雨强, 若选取 $S_{100} = 0.05 \text{ mm/h}$ 等值线范围进行分析, 根据雨强相似性关系 (1), 可以得到 $S_{80} = 0.1 \text{ mm/h}$, $S_{60} = 0.27 \text{ mm/h}$, $S_{35} = 0.62 \text{ mm/h}$, $S_0 = 142.65 \text{ mm/h}$ 。同时, 以 $S_{35} = 0.62 \text{ mm/h}$ 等值线为标准, 按几何相似关系换算 S_{60} , S_{80} , S_{100} 的影响范围, 在两个不同高程平面上, 雾化降雨影响区域的系列模型试验测试结果之间的对比见图 5。对比分析结果表明: 对于雾化降雨影响区域的大小和分布形状, 不同比尺模型试验测试结果之间是基本相似的, 说明在雾化模型试验中, 降雨影响范围具有几何相似性。

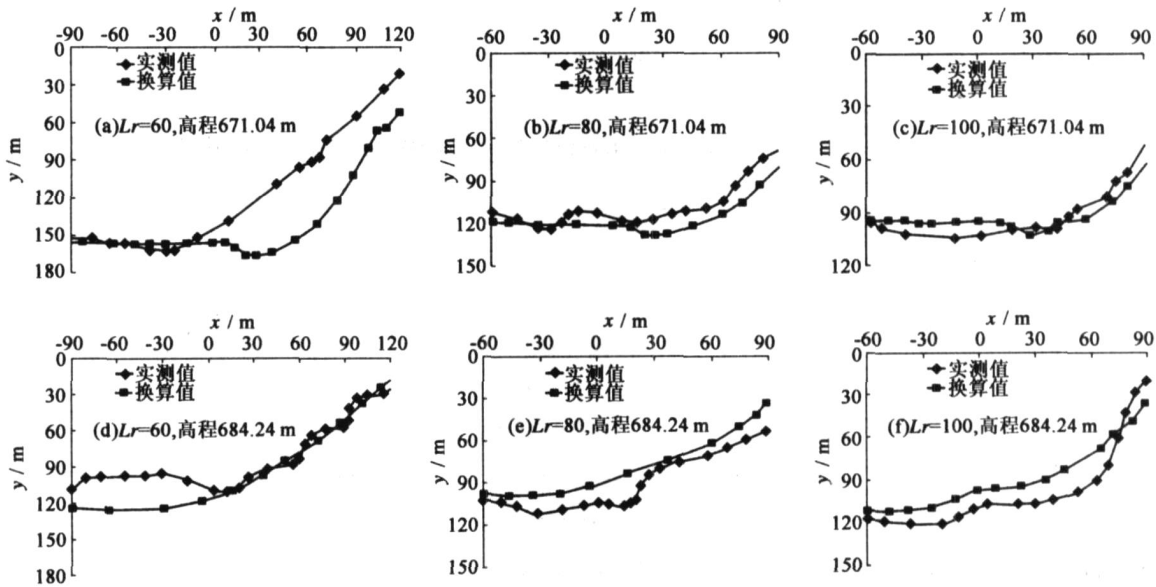


图 5 溅雨影响范围相似性比较

Fig. 5 Comparison of similarity of splash-rain influence scope

3 结 论

根据乌江渡水电站泄洪雾化原型观测资料, 进行了系列模型 (4 个不同比尺) 试验研究, 分析了水流 Re 和 We 数对泄洪雾化雨强的影响, 给出了泄洪雾化雨强的模型试验值与原型观测结果之间的相似关系, 论证了雾化降雨影响区域的几何相似。表明对于泄洪雾化降雨强度及其影响范围, 可以采用大比尺物理模型试验方法进行研究 and 预测, 模型试验结果可以按照一定规律引伸至原体。同时, 因泄洪雾化现象复杂, 影响因素众多, 雾化的形成机理尚不清楚; 目前, 数学模型不能完整模拟泄洪雾化现象, 数值模拟计算方法的发展和完善取决于泄洪雾化原型观测资料的不断积累; 原型观测是研究泄洪雾化问题的重要手段, 因原型观测工作难度大, 虽然

已经进行了许多工程的泄洪雾化原型观测工作, 取得了非常珍贵的原观资料, 但是比较全面和系统的原型观测资料匮乏, 需要深入开展这方面的研究工作。

参考文献:

- [1] 周辉. 泄洪雾化溅雨研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 1990. (ZHOU Hui. Study on splash rain of flood discharge atomization[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1990. (in Chinese))
- [2] 柴恭纯, 陈惠玲, 姜树海. 高坝泄流雾化及其影响研究——二滩水电站泄流雾化及其影响研究总报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1990. (CHAI Gong-chun, CHEN Hui-ling, JIANG Shu-hai. Research on discharge atomization of high dam and related influences—summary report of research on the discharge atomization of Ertan hydropower station and related influences[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1990. (in Chinese))
- [3] 周辉, 陈惠玲, 吴时强. 宽尾墩的泄洪消能效果与雾化影响[J]. 水力发电学报, 2008, 27(1): 58 - 63. (ZHOU Hui, CHEN Hui-ling, WU Shi-qiang. Flood discharge & energy dissipation effects and atomization influences of wide flange pier[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(1): 58 - 63. (in Chinese))
- [4] 吴时强, 吴修锋, 周辉, 等. 底流消能方式水电站泄洪雾化模型试验研究[J]. 水科学进展, 2008(1): 84 - 88. (WU Shi-qiang, WU Xiufeng, ZHOU Hui, et al. Model experiment study of effect of discharge atomization for energy dissipation by hydraulic jump[J]. Advances in Water Science, 2008(1): 84 - 88. (in Chinese))
- [5] 水电部中南勘测设计院. 乌江渡水电站高速水流原型观测成果总报告[R]. 长沙: 水电部中南勘测设计院, 1983. (Central Southern Geotechnical Design Institute, Ministry of Hydropower. Summary report on prototype observation results of high-speed water flow of Wujiangdu hydropower station[R]. Changsha: Central Southern Geotechnical Design Institute, Ministry of Hydropower. 1983. (in Chinese))

Discussion on the scale effect of discharge atomization-rainfall model^{*}

ZHOU Hui, WU Shi-qiang, CHEN Hui-ling

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: A series model method is adapted to the preliminary study of scale effect of discharge atomization-rainfall (A-R) model with the field observation result of discharge atomization for Wujiangdu power station. The effect of Re and We numbers of flow on the A-R intensity is analyzed. A conversion relationship of A-R intensity between prototype and model results is developed. The similitude criteria of the A-R range followed by discharge atomization model is discussed, and the conclusion is achieved that the surface tension of discharge A-R model is ignored when We number is larger than 500.

Key words: atomization-rainfall; scale effect; model test; Wujiangdu power station

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50579084).