

水垫塘三元流态及消能特征的 数值和实验研究¹⁾

许唯临 廖华胜 杨永全 吴持恭
(四川联合大学高速水力学国家重点实验室, 成都 610065)

摘要 采用数值模拟和实验测试相结合的方法对水利工程中高拱坝泄洪水垫塘三元流场进行研究. 获得了详细的流态特征, 得到了水垫塘三元典型流态概化图. 研究了水垫塘消能特性, 并据此将塘内水体划分为剪切消能区、撞击消能区和混掺消能区. 计算和实验所得的速度场及底板最大冲击动压相比较, 二者基本一致.

关键词 水垫塘, 流态, 消能特征

引 言

随着世界上修建的高坝日益增多, 其泄洪消能问题已成为水工水力学的一项重要的重要内容. 在各种消能方式中, 应用最广泛的是挑流消能. Mason 于 1982 年统计了近 30 年世界上 61 个国家修建的 370 座泄洪消能工程^[1], 其中有 183 座采用了挑流消能方式, 占 49%. 而据郭子中 1987 年的统计^[2], 我国近 30 年修建的泄洪消能工程中, 有 58% 属于挑流消能. 凡挑流消能, 坝下游均有消能水垫. 对于一些高水头大型工程, 为确保建筑物及下游岸坡的安全, 需花费巨资修建二道坝和混凝土衬砌的消能水垫塘. 这时, 水垫塘的合理设计便成为工程设计中的一项重大技术问题. 解决水垫塘的水力设计问题, 其根本途径在于深入研究高速水流在水垫塘中的扩散衰减规律及其能量的转换耗散机理. 迄今为止, 对水垫塘内的水流形态和消能特征尚缺乏全面的认识. 由于传统水力学方法难以解决这一问题, 故本文采用紊流数值模拟和现代测试技术, 对水垫塘流场进行研究, 以期对水垫塘流态及消能特征有一个基本的认识.

本文对小湾电站水垫塘的一种泄洪工况进行了三元数值模拟和三元速度场测试, 对拉西瓦电站水垫塘的五种泄洪工况进行了三元数值模拟和消能特性的归纳分析.

1 数学模型

对二维水垫塘或冲刷坑的数值模拟表明^[3sim 6], 湍流的双方程模型是模拟此类流动的有力工具. 因此, 这里的数学模型采用三元 $k - \epsilon$ 双方程模型, 其基本方程如下

连续性方程

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$U_i = \frac{\partial U_j}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} \quad (2)$$

¹⁾国家自然科学基金重点项目资助.

1996 - 04 - 30 收到第一稿, 1997 - 06 - 02 收到修改稿.

k 方程

$$\rho \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\rho}{k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \rho \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

方程

$$U_i \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\rho}{k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\rho}{k} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_2 \frac{\rho}{k} \quad (4)$$

式中 U_i , p , k 和 ν_t 分别为时均速度, 时均压强, 湍动能及其耗散率. 雷诺应力由涡粘性假设确定. $\nu_t = C_\mu k^2 / \epsilon$ 为涡粘性系数. 常数 C_μ , C_1 , C_2 , C_μ 和 C_ϵ 的值分别为 0.09, 1.44, 1.92, 1.0 和 1.3. 对上述方程采用控制体积法离散, 对流扩散项采用幂函数格式, 流场的计算采用 SIMPLER 方法, 对于边坡斜面边界的处理, 采用“冻结法”, 即对坡面以外的节点, 令各方程的源项 (记作 $S = S_p - p + S_c$, 其中 S 为源项, p 为通用变量) 中 $S_p = -10^{30}$ 和 $S_c = 0$, 从而使这些节点上的各变量值在计算中始终保持为零. 计算中, 自由表面采用法向速度为零, 其余变量的法向梯度为零的条件. 在水舌入水处, 按重力跌落由落差计算入射流速, 水舌宽度由模型实验给出, 水舌厚度由流量、流速和水舌宽度求出. 这里的计算中未计及掺气的影响.

2 实验方法

水垫塘内水流紊动剧烈, 并掺有大量空气, 使得水垫塘流场测试工作存在很大的难度. 鉴于水垫塘模型中的测量环境, 我们采用五孔毕托球作为测速仪器. 由于有五个动水压强测孔, 故可同时测量流场中的三维流速. 毕托球感受头部直径为 5 mm, 动压测孔孔径为 0.35 mm. 实验中, 毕托球每孔动水压强测管的末端各装设一只压力传感器, 各孔动水压强通过压力传感器转换成电信号后与数据自动采集处理系统相联接, 通过微机实现数据采集处理自动化.

由于毕托球动压测管的末端与压力传感器联接, 在测量过程中不会发生空气进入动压测管的现象, 从而解决了水流掺气条件下测量流速的技术困难. 该套装置的测速范围与所采用的传感器量程有关, 本文根据模型比尺选定传感器量程, 在该量程下, 流速最小可达每秒数毫米, 最大可达约 10 m/s. 所用的五孔毕托球经过厂家准确率定, 研究中曾在水槽中与旋浆式测速仪进行过精度比较, 相对误差均在 1% 以内.

3 水垫塘三元流态特征

图 1, 图 2 和图 3 分别为计算和实验所得的小湾电站水垫塘三元流场纵剖面、横剖面和水平剖面速度矢量图. 根据计算和实验结果, 可归纳出水垫塘三元典型流态特征.

在纵剖面上, 实验中难以施测水舌附近和水舌上游的流场, 在所测的区域内, 未见回流. 但计算结果反映出, 在水舌附近的水面处出现微弱的回流. 计算表明, 该回流的大小与水舌入水角度有较大关系. 随着入射角的减小, 该回流范围相应减小直至消失. 在水舌上游, 计算结果表明, 存在一个大的纵向漩滚. 数值模拟结果还表明, 高速射流在底板附近急剧转向, 这与我们从计算和实验所获得的底板动水压强在撞击点附近骤升, 而在此范围之外平缓得多这一结果是相一致的.

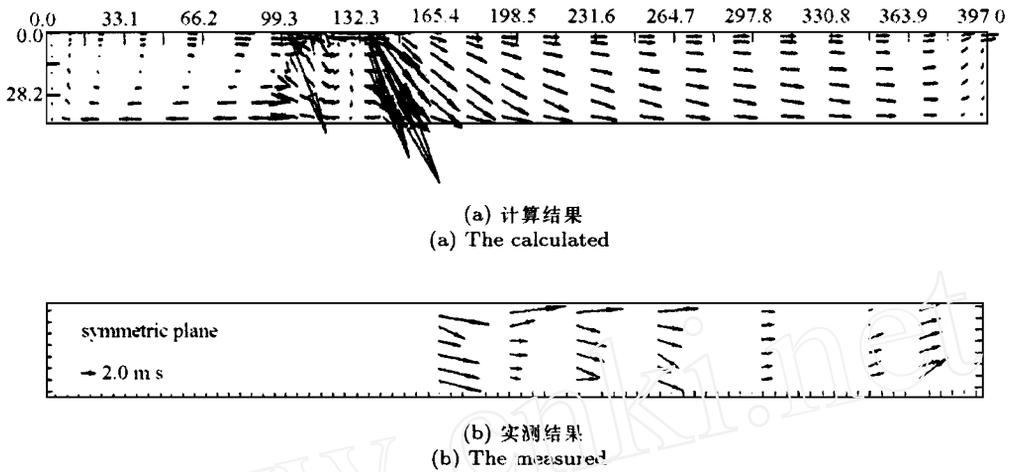


图 1 水垫塘流场纵剖面图
Fig. 1 Longitudinal section of flow field in plunge pool

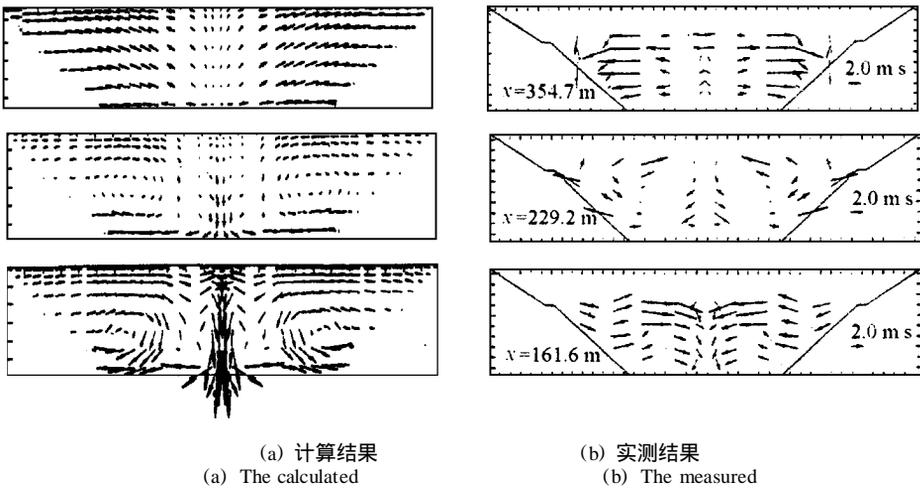


图 2 水垫塘流场横剖面图
Fig. 2 Transverse section of flow field in plunge pool

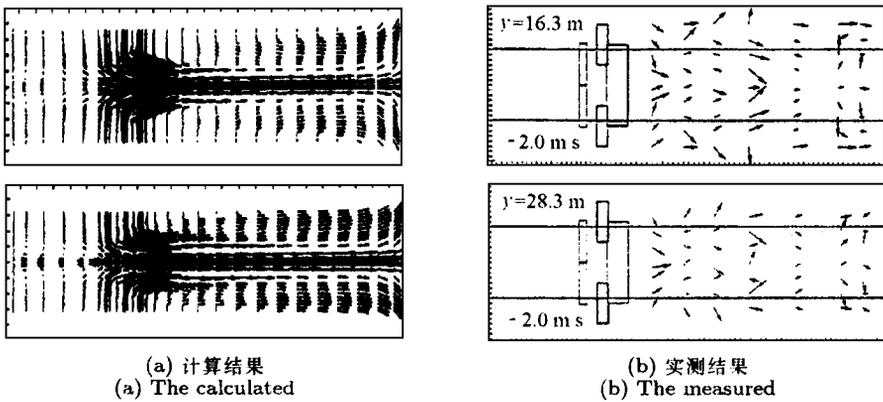


图 3 水垫塘流场水平剖面图

Fig. 3 Horizontal section of flow field in plunge pool

在横剖面上, 计算和实验均反映出, 塘内存在两个对称的横向环流. 表明水流在塘内呈螺旋状流动. 但若将水舌作进一步的横向展开, 使水舌入水宽度接近塘内水面宽时, 图 2 中所显示出的完整的横向环流将消失. 在部分剖面上还发现水面处有两个小的次生环流. 在二道坝附近, 横剖面上的水流形态呈现出放射状.

在水平剖面上, 数值模拟和实验测试结果均反映出, 纵向流速的横向分布存在多个峰值, 主流带的位置基本是与水舌入水形态相对应的.

从数值模拟和实验测试结果比较来看, 二者所得的水垫塘三元流场基本是一致的. 对拉西瓦电站水垫塘的数值模拟结果亦反映出同样的特征, 表明其具有一定的普遍性.

综合上述结果, 可以概化出水垫塘三元典型流态图, 如图 4 所示. 此外, 还采用“弹性盖”法^[7]计算了水垫塘水面形态, 一并绘于图 4 中, 由图中反映出水舌后和二道坝前存在的涌浪.

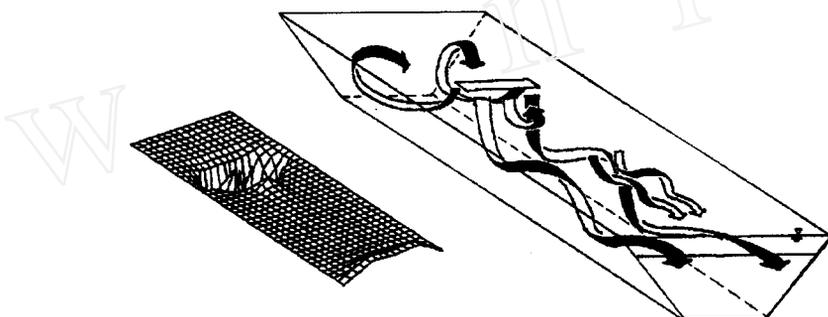


图 4 水垫塘三元典型流态概化图

Fig. 4 Typical pattern of 3-D flow field in plunge pool

4 水垫塘消能特征

解决水垫塘水力设计问题的根本途径在于深入了解射流在水垫塘内的运动规律及能量的传递和转换过程. 紊动能和紊动能耗散率是反映能量传递和转换特性的重要指标. 水流从射入到流出水垫塘之间所丧失的能量, 首先是由时均能转化成紊动能, 继而由于流体粘性而消耗为热能. 所谓消能过程实际上是能量的传递和转换过程.

图 5 绘出了拉西瓦电站水垫塘两种代表性工况下不同水平剖面上的紊动能分布. 图 6 为紊动能耗散率分布. 由图中可见, 水垫塘内的紊动能和紊动能耗散率均主要集中在射流轴线附近, 尤其是紊动能耗散率. 为此, 表 1 中统计了拉西瓦电站水垫塘中射流轴线附近约 50 m 范围内水体的紊动能和紊动能耗散率占整个水垫塘内紊动能和紊动能耗散率总量的百分比. 表中的结果再次表明, 水流的能量转换主要发生在射流轴线附近, 水垫塘内只有少部分水体参与了消能. 这对展开水舌之所以有利于消能提供了理论上的解释. 此外, 从紊动能及其耗散率的垂向分布可见 (参见图 5 和图 6), 紊动能和紊动能耗散率的最大值不在底板附近, 而是在水面和底板之间更靠近水面的位置. 这从消能特征方面为浅水垫消能提供了理论依据. 上述两项特征在一点上是共同的, 即反映出当水垫深度足够时, 水流剪切是水垫塘内最主要的消能方式. 在剪切运动最显著的水舌入水后一定距离内, 消能作用最大. 继而, 在射流冲至底板时, 因与底板撞击, 流线急剧弯曲, 能量得到第二次消杀. 所剩余能随水流带出射流主区, 在塘内散开并最终流过二道坝. 在运动过程中, 通过水流的紊动掺混, 使能量得到第三次消杀. 据此, 可将塘内水体分成三个消能区, 即剪切消能区、撞击消能区和混掺消能区, 如图 7 所示.

表 1 射流轴线附近水体的紊动能和紊动能耗散率所占百分比

Table 1 Percentage of k and ϵ near the jet axis

Run No.	1	2	3	4	5	6
Longitudinal distance X (m)	93—148	93—148	93—148	93—148	93—148	126—179
Water vol. within this limitation over total vol. (%)	23.7	23.7	23.7	23.7	23.7	22.5
Percentage of k in this limitation (%)	43.5	43.4	49.5	50.2	47.9	38.4
Percentage of ϵ in this limitation (%)	90.7	88.9	89.9	88.6	85.6	65.5

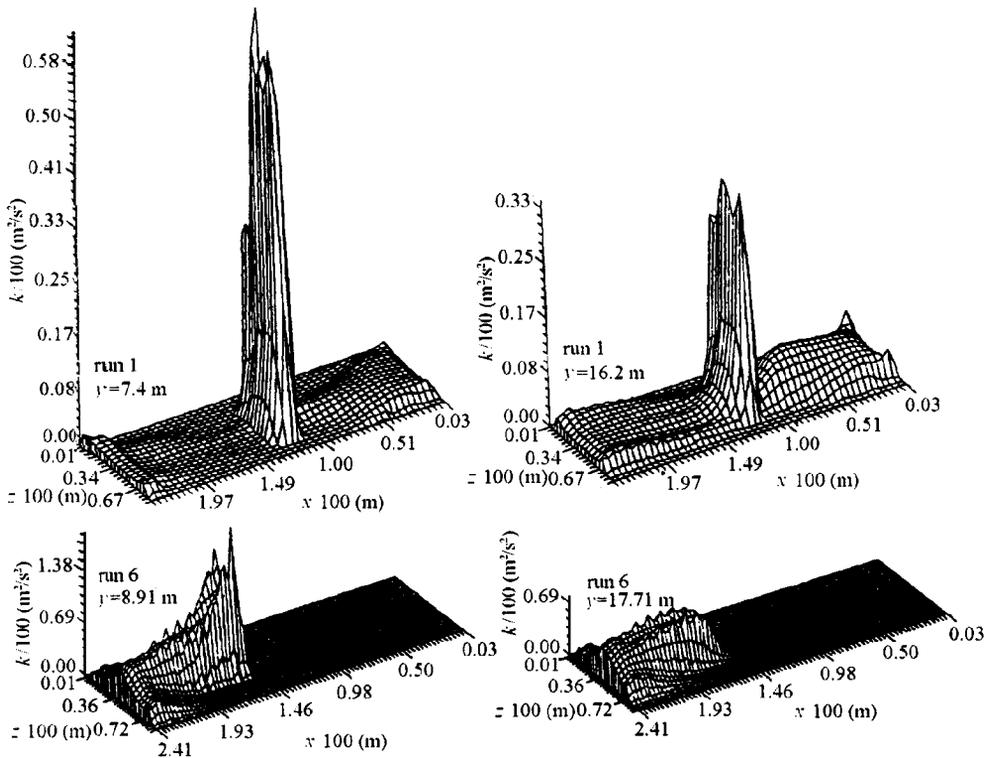


图 5 水垫塘内紊动能分布图

Fig. 5 Distribution of turbulent energy

从这一角度看，泄洪消能优化的目的即在于，提高剪切消能区在塘体内所占范围，减轻撞击消能区的撞击强度，并尽可能发挥混掺消能区的消能潜力。

为考察水垫深度的影响，在小湾水垫塘的研究中曾实测了不同水垫深度条件下，水垫塘中线上七个测点的冲击动压。结果表明，越靠近射流轴线，时均冲击动压随水垫深度的增加而减

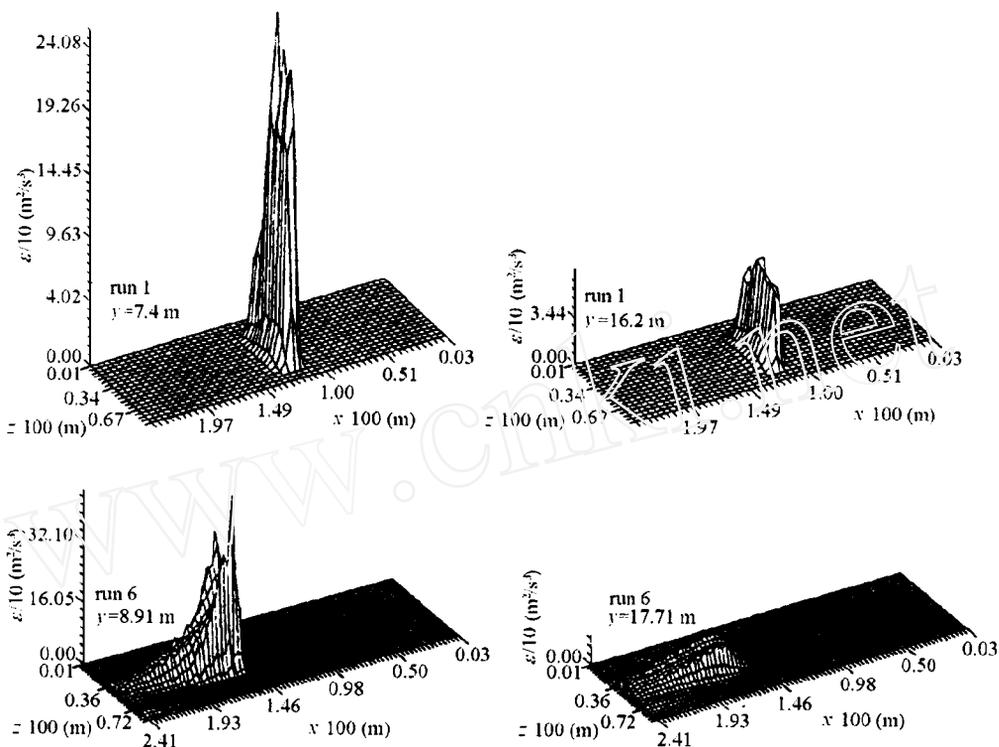


图 6 水垫塘内紊动能耗散率分布图

Fig. 6 Distribution of turbulent energy dissipation rate

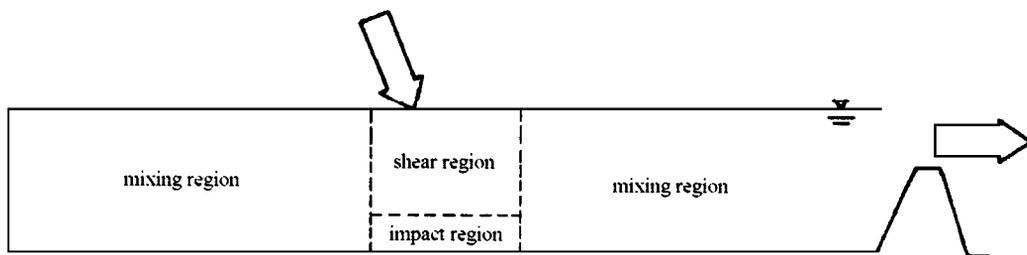


图 7 水垫塘内消能分区

Fig. 7 Regions of energy dissipation in plunge pool

小得越快. 这正反映出, 水垫深度的增加, 是通过增加剪切消能区的垂向范围, 从而更充分地发挥剪切消能作用, 来达到降低底板冲击荷载的效果.

将上述两个电站水垫塘各泄洪工况下底板最大动水压强的计算值和实验值进行比较, 误差在 4.9%~17.8%之间, 二者基本一致.

5 结 语

1) 为了解决水垫塘的水力设计问题, 根本途径在于深入研究挑射水舌在水垫塘内的扩散规律及紊动特性. 计算和实验所得的时均速度场和紊动特征量分布反映出水垫塘的流态和消能

特征, 据此所归纳出的水垫塘三元典型流态概化图和消能分区, 有助于深入认识水垫塘水流运动和消能规律.

2) 水垫塘泄洪消能优化的目的, 归纳起来在于, 尽可能提高剪切消能区在塘内所占范围 (如通过分散水舌的方式), 减轻撞击消能区的撞击强度 (如造成动水垫), 并发挥混掺消能区的消能潜力.

3) 将三元紊流数值模拟技术与现代测试技术相结合, 能详细地揭示流场内的时均流特性和紊动特性, 是研究水垫塘水流运动规律及消能机理的有效途径.

参 考 文 献

- 1 Mason PJ. The choice of hydraulic energy dissipator for dam outlet works based on a survey of prototype usage. *Proc Inst Civ Engrs*, 1982, 72 (1): 209 ~ 219
- 2 Guo ZZ. Energy Dissipation of high - velocity flow. In: Lin BN ed. *Proc. Int. Symp. on Hydraulics for High Dams*, Beijing, 1988. Beijing: Tsinghua University Press, 1988. 17 ~ 32
- 3 杨永全, 许唯临. 水垫塘淹没射流的数值模拟. *水动力学研究与进展*, 1991, A6 (4): 36 ~ 44 (Yang YQ, Xu WL. Numerical simulation of submerged jet within a water cushion pool, *Journal of Hydrodynamics*, 1991, A6 (4): 36 ~ 44 (in Chinese))
- 4 陈永灿, 许协庆. 挑流冲坑内水流特征的数值模拟. *水利学报*, 1993, (4): 48 ~ 54 (Chen YC, Xu XQ. Numerical simulation of the characteristics of free overfall jets in downstream scour hole, *Journal of Hydraulic Engineering*, 1993, (4): 48 ~ 54 (in Chinese))
- 5 Xu WL, Liao HS, Yang YQ. A study on jet into a plunge pool. In: Yan KQ ed. *Proc. 2nd Int. Conf. on Hydro - Science and Engineering*, Beijing, 1995. Beijing: Tsinghua University Press, 1995. 317 ~ 321
- 6 Barata JM, Durao DF, Heitor MV, et al. On the analysis of an impinging jet on ground effects. *Experiments in Fluids*, 1993, 15 (1): 117 ~ 129
- 7 Xu WL, Yang YQ, Wu CG. Numerical calculation of turbulent flow with free surface. *J Hydrodynamics*, 1991, B3 (1): 82 ~ 89

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE 3 - D FLOW FEATURE AND ENERGY DISSIPATION CHARACTERISTICS OF PLUNGE POOLS¹⁾

Xu Weilin Liao Huasheng Yang Yongquan Wu Chigong

(State Key Hydraulics Laboratory of High Speed Flows, Sichuan Union University, Chengdu 610065, China)

Abstract Investigating the flow field of plunge pool is the basis of studying the energy dissipation problem in plunge pool. However, the flow features in plunge pool have not been understood fully up to now. Not only little has been obtained for the numerical simulation (especially the 3 - D numerical simulation), but the 3 - D flow field has not been measured in physical model. In fact, it is the combination of numerical and experimental methods that is effective in the research of such complicated flow as in plunge pool.

In this paper, the 3 - D flow field of the plunge pool in hydraulic engineering is investigated by

¹⁾ The key project supported by the National Natural Science Foundation of China.

combining the numerical simulation and experimental measurement. The detailed flow feature and typical pattern of the 3 - D flow field are obtained. The energy dissipation characteristics is studied. The water body in the plunge pool is divided into three regions , i. e. shear dissipation region , impact dissipation region and mixing dissipation region. The way of the optimization of plunge pool and dam outlets should be : expanding the range of the shear dissipation region (e. g. dispersing the nappes) , reducing the impact intensity in the impact dissipation region (e. g. forming moving water cushion) , and making use of the water body in the mixing dissipation region as much as possible. The computational and experimental velocity field and the maximum pressure on the bottom of the plunge pool are compared and are in agreement.

Key words plunge pool , flow feature , energy dissipation characteristics