

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.03.005

桩墩影响下的水动力数值模拟

解鸣晓¹, 张 玮^{1, 2}

(1. 河海大学海洋学院, 江苏 南京 210098; 2. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要:建立平面二维数值水槽模型, 将桩墩作为不透水边界处理, 利用三角形加密网格精确模拟桩墩形状, 计算分析缓流河道中单排桩墩影响下水位和流速的变化, 并探讨了方墩与圆墩对水流变化的影响差异以及糙率与紊动黏性系数对壅水数值的敏感性。研究表明: ①桩墩引起的水流变化沿纵、横向呈现出不同的分布形式, 沿横向呈波状分布。墩身上游主要表现为水位壅高, 流速减小; 墩身下游则表现为水位跌落, 流速在墩间区域增加, 而在墩后区域减小。②方墩对水流变化的影响比圆墩大; 上游壅水随糙率变化较小, 但对紊动黏性系数的变化较为敏感。

关键词: 桩墩壅水; 数学模型; 紊动黏性系数; 糙率; 敏感性分析

中图分类号: TV131.2; U443.2 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2008)03-0020-05

Numerical simulation of open channel flow influenced by pile piers//XIE Ming-xiao¹, ZHANG Wei^{1, 2} (1. College of Ocean, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: A 2-D numerical model for open channel flow influenced by pile piers is set up, considering the piers as impermeable area. The method of gradually refined triangular meshes is used to simulate the shape of piles with high precision. Based on this model, the water level and velocity of water flow, which are influenced by single line piers, are calculated, and the differences in the influence of square piles and circular piles on water flow are discussed. Furthermore, the effect of Manning's roughness and eddy viscosity on the upstream backwater is analyzed. The result shows that the variation of water level and velocity caused by piles are different along the vertical-section and cross-section, and the variation of water level presents a "wave-like" distribution along the cross-section. In general, the water level rises and the velocity decreases in the upper reaches, while in the lower reaches the water level falls and the velocity increases. It can also be concluded that square piers have greater influence on water flow than circular ones, and the backwater upstream is more sensitive to the eddy viscosity than to the Manning's roughness.

Key words: backwater of pile piers; numerical model; eddy viscosity; Manning's roughness; sensitivity analysis

在平原河道中兴建桥梁或高桩码头, 立在水中的大量桩墩将引起上下游水流的变化, 如引起常见的上游壅水现象等。桩墩对水流的影响十分复杂, 涉及水流、地形条件、桩墩形状及其排列等因素。在以往研究桩墩影响的工作中, 通常使用经验公式^[1-2]、原型观测^[3]、模型实验^[4-5]等 3 种方法。然而, 这几种研究方法都存在一定的不足, 如采用经验公式求解解析解时往往需要大量简化和假设, 特别是将壅水值视作沿程线性分布, 沿横向不变, 甚至是全程不变, 难以真实反映实际情况; 原型观测存在不可重复性, 无法与工程前进行自由对比, 也难以进行工程后预测; 至于物理模型实验, 由于平原河流中的壅水往往是厘米级, 经过相似比尺转换后, 模型中的壅水不足 1 mm, 与模型水位的测量精度基本处于同

一量级, 测量较为困难, 无法得到其变化分布规律。

近年来随着计算机软硬件技术的迅速发展, 数值模拟方法显示出诸多优点, 已经在工程中得到广泛应用^[6-12]。文献[6-8]采用二维水动力数学模型研究桩墩对水流的影响, 通过对桩墩所在网格进行等效加糙的方法对桩墩进行概化处理, 其不足之处在于不能描述桩墩的真实形态, 以及不能准确模拟桩墩形状对水流的影响, 从而无法给出桩墩附近的水流条件, 这一缺陷在桩墩数量增多时尤为明显。文献[9-10]尝试将桩墩作为不透水区域直接模拟, 但由于桩墩附近网格剖分不够细致, 所得到的局部水流条件较为粗糙。笔者将通过建立数值水槽模型研究不同形状的多个桩墩对水流的影响规律, 模型中将桩墩作为不透水区域处理, 采用三角形网格精

确模拟桩墩形状,同时对影响壅水数值的糙率和紊动黏性系数进行敏感性分析。

1 水槽数值模型的建立

1.1 基本方程

天然河道一般河宽水浅,流速、加速度等沿垂直方向上的变化相对于平面其他 2 个方向小得多,故略去这些量沿垂向的变化,将三维 Navier-Stokes 方程沿水深积分,得到如下方程组^[13],其中,方程(1)为水流连续方程,方程(2)和方程(3)为动量方程。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial Z_b}{\partial x} \right) - \frac{E_{xx}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{E_{xy}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{gu}{c^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial Z_b}{\partial y} \right) - \frac{E_{yx}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{E_{yy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{gv}{c^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0 \quad (3)$$

式中: x, y 分别表示纵向和横向; u, v 分别为 x, y 方向的流速, m/s ; t 为时间, s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; h 为水深, m ; Z_b 为底面高程, m ; ρ 为水体密度, kg/m^3 ; c 为 Chezy 系数, 计算时采用曼宁公式进行转换^[14]; $E_{xx}, E_{xy}, E_{yx}, E_{yy}$ 为各方向的紊动黏性系数, $Pa \cdot s$, 文中采用各向同性假设, 即 $E_{xx} = E_{xy} = E_{yx} = E_{yy} = E$ 。

1.2 数值求解方法

求解过程中,时间离散采用有限差分法,空间离散采用有限单元法。离散区域内采用六节点三角形等参单元,以便于复杂边界的模拟。插值函数选择为对流速进行二次插值,对水位进行线性插值。求解采用 Galerkin 加权剩余法形成整体矩阵,并利用 Newton-Raphson 方法将其线性化,迭代求得数值解^[13]。

1.3 模型河段和网格形式

建立长河段矩形断面水槽模型,水槽长 10 km,宽 250 m,槽底纵比降为 0.01%。模型中设有 4 个桩墩,平面布置见图 1。研究中选取方墩和圆墩 2 种墩形,其中方墩长宽均为 2 m,圆墩直径也为 2 m。整个模型范围内网格节点总数为 13 846,单元总数为 6 684,其中最大单元尺寸为 60 m,最小单元尺寸为 0.39 m。整体模型网格示意图见图 2,桩墩周围局部网格见图 3。

1.4 计算参数与计算条件

曼宁糙率 n 和紊动黏性系数 E 是计算中最重

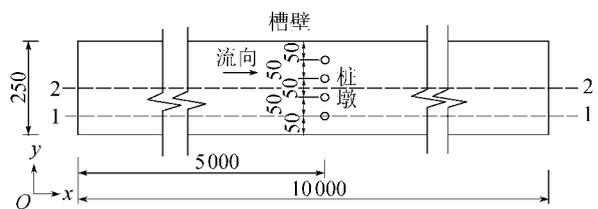


图 1 模型尺寸与桩墩位置示意图(单位:m)



图 2 整体模型网格示意图

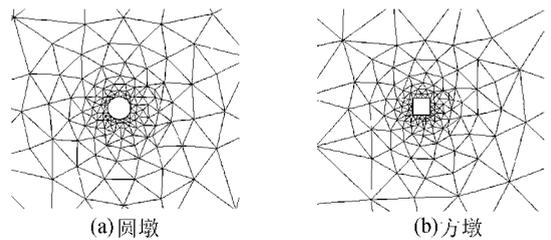


图 3 桩墩周围网格

要的参数,在计算时,设槽底 $n = 0.025$, $E = 500 Pa \cdot s$ 。

为了便于分析水位、流速的变化规律,设计工程前流态为均匀流,设定流速 $v = 2.00 m/s$,由 Chezy 公式^[14]计算求得正常水深 $h = 11.18 m$,流量 $Q = 5590 m^3/s$,并分别设置为下游和上游边界条件,相应的弗劳德数 $Fr = 0.191$,属于缓流范围。计算时采用非恒定方法逼近恒定流,时间步长 $\Delta t = 1.0 h$ 。由于研究的重点不在于边界层,故计算中两侧陆地采用滑动边界。

2 桩墩影响下水流变化的平面分布规律

为了研究水流变化的平面分布规律,分别从纵、横 2 个方向对水位和流速的变化进行讨论。考虑到桩墩布置的对称性,取 $y = 50 m$ 和 $y = 125 m$ 两个代表纵断面,分别定义为纵断面 1—1 和纵断面 2—2 (图 1)。同时也在桩墩位置($x = 5000 m$)前后取若干横断面进行观测。

2.1 水流的纵向变化规律

以方墩条件下的纵断面 1—1 和 2—2 为例,将工程后的水位和流速与工程前的相减,分别得到水位和流速的变化值 Δz 和 Δv (表 1),桩墩附近的水位和流速变化见图 4。

纵断面 1—1 的计算结果表明:①受墩身阻流影响,上游流速减小,水流动能降低,水位抬高从而势能增加。从图 4 可以看出,墩身处冲高达 195 mm,然后向上游迅速回落,至墩身上游 40 m 左右处已经降至 19 mm,此后壅水值以缓慢的速度向上游继续减

表 1 不同纵断面水位、流速变化值比较

断面位置	纵断面 1—1		纵断面 2—2	
	$\Delta z/\text{mm}$	$\Delta v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\Delta z/\text{mm}$	$\Delta v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
$x = 0 \text{ m}$	15	-0.003	15	-0.003
$x = 4000 \text{ m}$	16	-0.003	16	-0.003
$x = 4500 \text{ m}$	17	-0.003	17	-0.003
$x = 4900 \text{ m}$	18	-0.004	17	-0.004
$x = 4950 \text{ m}$	18	-0.008	18	-0.007
$x = 4998 \text{ m}$	179	-1.679	6	0.053
$x = 5000 \text{ m}$			3	0.063
$x = 5002 \text{ m}$	-99	-1.753	2	0.069
$x = 5050 \text{ m}$	-2	-0.308	-2	0.088
$x = 5100 \text{ m}$	-1	-0.190	-1	0.082
$x = 5500 \text{ m}$	0	-0.036	0	0.004
$x = 6000 \text{ m}$	0	-0.015	0	-0.010
$x = 8000 \text{ m}$	0	-0.004	0	-0.002
$x = 10000 \text{ m}$	0	-0.002	0	-0.001

注:表中正值表示水位壅高或流速增大,负值表示水位跌落或流速减小。

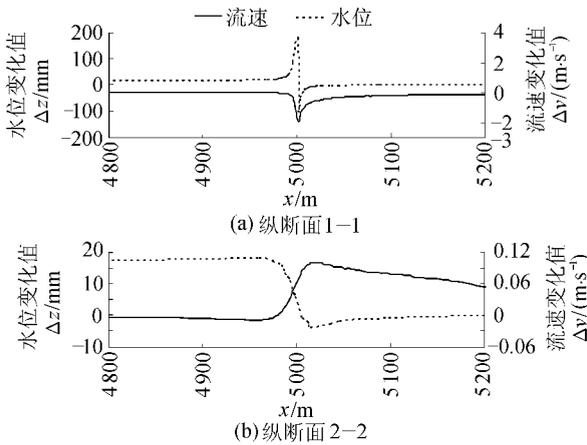


图 4 桩墩附近的水位和流速变化(纵向)

小 ②由于水流在墩身分离,墩后水量减少,从而在下游形成跌水,流速也减小。跌水值也在墩身处最大,达 99 mm,此后向下游迅速衰减直至跌水消失。

纵断面 2—2 的计算结果表明:①水位变化仍然呈现上游壅水、下游跌水的现象,但变化幅度较小,其中最大壅水 Δz_{\max} 为 18 mm,最大跌水仅为 4 mm;②最大壅水和最大跌水并非出现在墩身所在的横断

表 2 不同横断面水位、流速变化值比较

断面位置	$y = 0 \text{ m}$		$y = 25 \text{ m}$		$y = 50 \text{ m}$		$y = 75 \text{ m}$		$y = 100 \text{ m}$		$y = 125 \text{ m}$	
	$\Delta z/\text{mm}$	$\Delta v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$										
桩墩上游 1000 m	16	-0.003	16	-0.003	16	-0.003	16	-0.003	16	-0.003	16	-0.003
桩墩上游 500 m	17	-0.003	17	-0.003	17	-0.003	17	-0.003	17	-0.003	17	-0.003
桩墩上游 100 m	17	-0.001	17	-0.001	17	-0.002	18	-0.003	18	-0.004	18	-0.005
桩墩上游 50 m	15	0.007	16	0.003	17	-0.003	18	-0.006	18	-0.008	18	-0.009
桩墩上游 10 m	9	0.036	11	0.030	32	-0.073	13	0.019	32	-0.076	13	0.020
桩墩下游 10 m	4	0.061	1	0.075	-12	-0.764	-3	0.093	-14	-0.796	-3	0.095
桩墩下游 50 m	0	0.079	-1	0.081	-1	-0.287	-2	0.088	-2	-0.308	-3	0.090
桩墩下游 100 m	-1	0.078	-1	0.077	-1	-0.166	-1	0.077	-1	-0.182	-1	0.079
桩墩下游 500 m	0	0.061	0	0.033	0	-0.034	0	0.005	0	-0.036	0	0.004
桩墩下游 1000 m	0	0.042	0	0.019	0	-0.008	0	-0.010	0	-0.014	0	-0.010

注:由于横向水流分布具有对称性,故只列至 $y = 125 \text{ m}$ 处。

面位置 ($x = 5000 \text{ m}$),而是分别出现在墩身上、下游约 30~40 m 的位置;③下游流速增大,在墩身下游 20 m 左右达到最大 ($\Delta v_{\max} = 0.1 \text{ m/s}$),并沿下游方向逐渐降低。

从以上结果中可以看出 2 个纵断面的水流变化既有相同之处也存在着明显的不同,主要表现在:①受墩身直接阻水作用,纵断面 1—1 墩身处的水位变化更为剧烈;②下游流速变化差异较大,纵断面 1—1 在墩后流速降为最低,然后向下游逐渐增大,而纵断面 2—2 的流速在桩墩下游附近达到最大,并向下游逐渐减小。此外,计算也反映出了壅水与跌水的差异:①跌水的数值比壅水小,纵断面 1—1 最大壅水是最大跌水的 2.0 倍,纵断面 2—2 则达到 4.5 倍;②跌水的影响距离比壅水小得多,本例中壅水影响一直持续到上游很远处,在进口仍有 15 mm 的壅水,而跌水在桩墩下游 300~400 m 处就已经消失。

2.2 水流的横向变化规律

在墩身阻水作用下,水位和流速在横断面方向将重新分布,计算结果见表 2 和图 5~8,主要表现出以下特征:①水位和流速变化沿河宽方向呈波浪状分布,其中波峰和波谷出现在墩身或墩间中线所

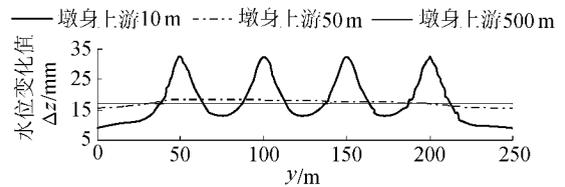


图 5 桩墩上游横断面水位变化比较

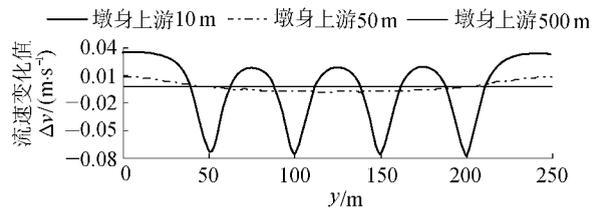


图 6 桩墩上游横断面流速变化比较

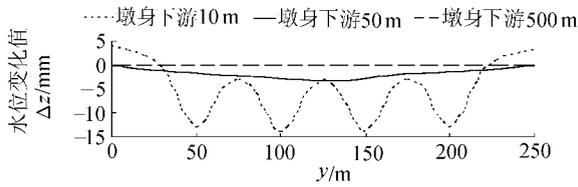


图7 桩墩下游横断面水位变化比较

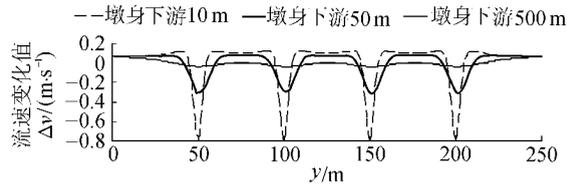


图8 桩墩下游横断面流速变化比较

在位置,如上游水位变化的波峰和波谷分别出现在墩身和墩间,但上游流速变化的波峰和波谷则分别出现在墩间和墩身。②横断面位置距离桩墩越近,水流变化的波动越剧烈,幅度也越大,随着距离的增加,在水体黏性和动量交换的作用下,波形逐渐变得平顺,变化幅度也减小,例如墩身上、下游500m处,水位已经近似成为直线,即沿横向水位不变。③水位变幅在墩身上游较大,而下游较小。从表2可以看出,墩身上游10m处最高壅水达32mm,墩身上游1000m处也有16mm,而墩身下游10m处最大跌水仅为14mm。④流速变幅在墩身下游较大,而上游较小。表2中墩身下游10m处流速变幅为 $-0.796 \sim -0.093$ m/s,而墩身上游10m处流速变幅只有 $-0.076 \sim 0.036$ m/s。⑤桩墩上游水位与流速变化的波峰和波谷趋势相反。如果将墩身上游500m处的水流状态作为基准线($\Delta z = 17$ mm, $\Delta v = -0.003$ m/s),从图5和图6中可以看出,相对于基准线水位壅高越大,流速降低越多;反之,水位跌落越大,流速增加越多,这种关系实质上是能量守恒在水流横向分布中的一种体现。⑥桩墩下游水位与流速变化的波峰和波谷趋势相同。如果将下游的过水断面划分为墩间和墩后2个区域,比较图7和图8可以看出,墩间区域流速增大,水位相对较高;而墩后区域则流速减小,水位也相对较低。产生这种现象的原因主要与墩身阻水、水流分离有关,水流分离使得墩间过水断面收缩、水流加速,而墩后形成漩涡回流,其水位也相对较低。

总之,桩墩引起的水流变化沿纵、横断面分别呈现出不同的特点,并随位置不同而有所变化,尤其是桩墩上、下游水流的变化存在一定差异。在进行桩墩壅水评价时,必须注意取值点位置,判断该位置的壅水值是否在横向达到均匀分布,此外,在进行模型实测点布置时,在桩墩附近应注意加密测点,远离桩墩则可以适当减少测点。

3 墩形对水位变化的影响

实际工程中的桩墩具有多种形态,如方形、圆形等,其阻水效应各不相同,对水流的影响程度也不同。分别就方墩和圆墩2种墩形进行计算,分析墩形对水位变化的影响,计算结果见图9~10。从图9~10中可以看出,2种墩形影响下的水位变化平面分布规律相似,但无论是纵向的壅水、跌水还是横向的波形变幅,方墩对水流的影响程度都比圆墩大。这是因为尽管方墩与圆墩在水流方向上的投影面积相同,但方墩的迎水面与流速垂直且有折角,而圆墩迎水面为曲面且较为平顺,故方墩的阻流和挑流效应均更强,对水流变化的影响也更为明显。

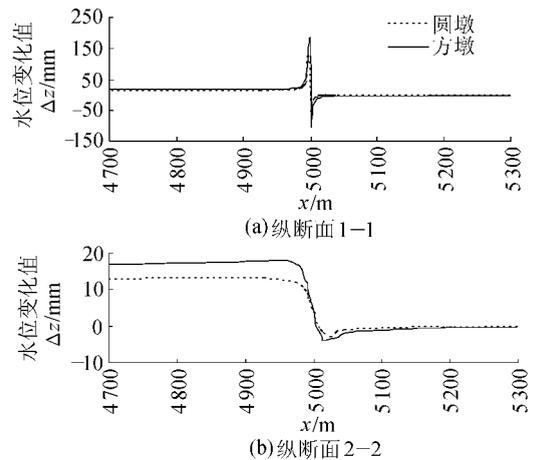


图9 桩墩附近水位变化的比较(纵向)

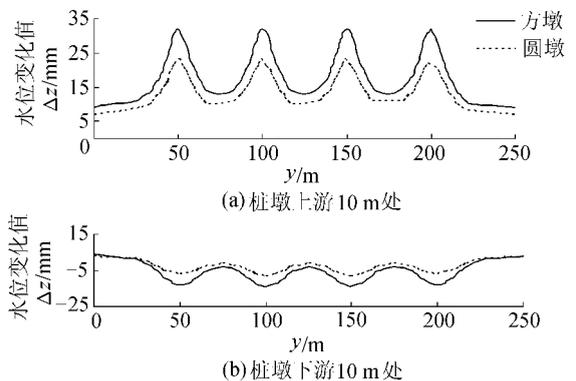


图10 桩墩附近水位变化的比较(横向)

4 壅水的参数敏感性分析

在水动力方程的求解中,紊动黏性系数 E 和曼宁糙率 n 是2个最重要的基本参数,直接影响到水位、流速的计算结果。然而,在天然河道的水力计算中,上述参数的合理确定具有一定的难度,特别是 E 的取值较难确定^[15]。为了评价 E 和 n 的取值对壅水的影响,在模型河段中,分别对它们进行单参数敏感性分析。

取桩墩上游500m,1000m和上游进口处的壅水

值作为对比指标,由前述分析可知,以上位置的壅水已经在宽度方向均匀分布。给定 $E = 500 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $n = 0.0200 \sim 0.0300$, 分别计算壅水值, 计算结果见表 3。给定 $n = 0.025$, $E = 100 \sim 1100 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 壅水值计算结果见表 4。由表 3 和表 4 可知, 壅水值对 n 的变化不敏感, 随着 n 的增加, 壅水值变幅很小; 但壅水值对 E 的变化较为敏感, 随着 E 的增加, 壅水值近似呈线性增加。

表 3 $E = 500 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时的糙率敏感性分析

n	墩身上游 500 m 处壅水/mm		墩身上游 1000 m 处壅水/mm		进口处壅水/mm	
	方墩	圆墩	方墩	圆墩	方墩	圆墩
0.0200	17	12	18	13	15	11
0.0225	17	12	17	13	15	11
0.0250	17	12	16	12	15	11
0.0275	17	12	17	12	14	10
0.0300	17	12	16	11	14	10

表 4 $n = 0.025$ 时的紊动黏性系数敏感性分析

$E/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	墩身上游 500 m 处壅水/mm		墩身上游 1000 m 处壅水/mm		进口处壅水/mm	
	方墩	圆墩	方墩	圆墩	方墩	圆墩
100	7	4	6	3	6	3
300	13	9	12	8	11	7
500	17	13	16	12	15	11
700	21	16	20	15	18	13
900	25	19	24	18	21	16
1100	28	22	27	21	24	19

5 结 论

a. 笔者应用水动力数值水槽模型研究多个桩墩影响下水流的变化规律, 在模型计算中将桩墩作为不透水区域处理, 采用三角形无结构加密网格模拟其边界, 可以精确描述桩墩形状, 在此基础上研究不同形状的多个桩墩对水流的影响。

b. 桩墩引起的水流变化主要与墩身的阻、挑流作用以及水流分离等有关。数值试验表明, 桩墩引起的水流变化沿纵、横向呈现出不同的分布形式, 且随位置不同而有所变化, 特别是沿横向呈波状分布。其中, 桩墩上游主要表现为水位壅高, 流速减小; 而下游则表现为水位跌落, 流速在墩间区域增加, 而在墩后区域减小。值得注意的是, 桩墩上游水位和流速变化的波状曲线形状(相位)相反, 而下游则相同。此外, 距离桩墩越近, 水位、流速的变化幅度越大, 随着距离的增加, 水流沿纵向变化趋缓, 沿横向变化趋于均匀。

c. 相同尺寸的方墩与圆墩对水流变化的影响规律相似, 但方墩的影响量值和范围均比圆墩大。

d. 数值试验表明, 上游壅水值随糙率变化不大, 但对紊动黏性系数的变化较为敏感。由此可见,

在进行壅水计算时, 应慎重选择紊动黏性系数的数值。

当然, 桩墩附近的水流三维特征明显, 流场结构复杂, 特别是实际工程中往往存在斜交、不同来流以及多排桩墩的情况, 数值模拟研究工作还有待进一步深化。特别是紊动黏性系数的取值十分重要, 需要进行深入的探讨。

参考文献:

- [1] 拾兵, 贺如泓, 于诤方. 斜交桥渡的壅水及设计计算[J]. 水科学进展, 2001, 12(2): 201-205.
- [2] 浦瑞年, 李国斌. 桩墩壅水高度计算公式的探讨[J]. 江苏水利, 2004(6): 18-21.
- [3] CHARBENEAU R J, HOLLEY E R. Backwater effects on bridge piers in subcritical flow[R]. Austin, U. S.: Center for Transportation Research, University of Texas, 2001.
- [4] 孙国梁, 伍冬领, 黄世昌. 钱塘江第三大桥桩墩壅水情况分析[J]. 公路, 1994(7): 26-29.
- [5] 孟庆义, 张春义. 桩墩壅水特性试验研究[J]. 北京水利, 1996(5): 41-44.
- [6] 曹民雄, 甘小荣, 周丰年, 等. 潮汐河段桩墩对水流影响的数值计算与分析[J]. 人民长江, 2006, 37(4): 81-84.
- [7] 袁雄燕, 徐德龙. 丹麦 MIKE21 模型在桥渡壅水计算中的应用研究[J]. 人民长江, 2006, 37(4): 31-32.
- [8] 陈绪坚, 胡春宏. 桥渡壅水平面二维数学模型模拟研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2003, 1(3): 194-199.
- [9] 张玮, 吴苏舒, 徐宿东, 等. 南京外秦淮河三山桥拓宽工程洪水壅高数值模拟[R]. 南京: 河海大学, 2004.
- [10] 王晓妹, 张玮, 廖鹏. 上海近海风电场桩群对潮流影响研究[EB/OL]. [2006-06-20]. <http://www.paper.edu.cn>.
- [11] 周宜林, 道上正规, 桧谷治. 非淹没丁坝附近三维水流运动特性的研究[J]. 水利学报, 2004(8): 46-53.
- [12] 曹继文, 陈惠泉, 贺益英. 明渠岸边横向取水口的三维数值计算[J]. 水利学报, 2004(2): 119-125.
- [13] 汪德. 计算水力学理论与应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989.
- [14] 李家兴, 赵振兴. 水力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2001.
- [15] 陈永平, 刘家驹, 喻国华. 潮流数值模拟中紊动黏性系数的研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2002, 30(1): 39-43.

(收稿日期 2007-12-28 编辑 骆超)

