

桥墩不同组合方式的阻水效应初探

谢至正,何 杰,韩玉芳

(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 210024)

摘要:桥梁的整体阻水是反映桥梁阻水能力的重要参数,其由桥墩个数和单墩迎水面宽度共同决定。针对宽浅型河道的桥墩群阻水效应问题,采用水流数学模型对矩形数值水槽中的桥墩群阻水效应进行了模拟。在相同阻水比条件下,选取单个桥墩迎水宽度和桥墩数量作为变动因子,从数值水槽水流沿程的流速、墩前冲高和平均壅高3个方面,分析对比不同桥墩群组合方式产生的阻水效应差异。研究结果表明,相同阻水比条件下,单墩尺寸较小的桥墩群组合方式产生的整体阻水效应也相对较小,可为桥梁工程设计和防洪评价计算提供参考依据。

关键词:桥墩壅水;数值水槽;桥墩尺寸;河道防洪

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2024)08-0006-0006

Preliminary study on the water blocking effect of different combinations of bridge piers

XIE Zhizheng, HE Jie, HAN Yufang

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The overall water resistance of a bridge is an important parameter to reflect the water resistance ability of a bridge, which is determined by the number of piers and the width of the water facing surface of a single pier. Regarding the water blocking effect of bridge piers in wide and shallow river channels, the water blocking effect of pier groups in a rectangular numerical channel is simulated by using a flow mathematical model. Under the same water resistance ratio, the width and number of piers were selected as the variable factors, and the water resistance effects of different pier groups were analyzed and compared from the three aspects of the flow velocity along the numerical flume, the height of the piers ahead and the average height of the piers. The results show that under the same water resistance ratio, the overall water resistance effect is relatively small for the combination of pier groups with small pier size, which provides a reference for bridge engineering design and flood control evaluation.

Key words: backwater of bridge pier; numerical water tank; pier size; river flood control

位于河道中的桥墩会占用河道过流面积,降低河道过流能力,特别是洪水来临时,桥墩上游的水位壅高可能影响桥梁安全及上游河道两岸工程的安全,因此桥墩壅水效应对于桥梁防洪影响评价有

重要的意义。《公路工程水文勘测设计规范》(JTG C30—2015)要求建桥后引起的桥前壅水高度、流速变化和河床变形,应在安全允许范围之内^[1];《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)要求桥涵孔

收稿日期:2024-05-13

基金项目:南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y222003)

作者简介:谢至正(1998—),男,硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:zzhengxie@126.com

径设计必须保证设计洪水以内的各级洪水及流冰、泥石流、漂浮物等安全通过,并应考虑壅水、冲刷对上下游的影响,确保桥涵附近路堤的稳定^[2]。

近年来,关于桥墩阻水效应的相关研究日趋增多。王开等^[3]以水工模型试验资料为基础,对比分析了不同的桥墩壅水高度计算公式,指出适用于大流量下小阻水比桥墩的缓流壅水高度计算公式;张慧等^[4]通过建立模型试验,研究建桥前后的壅水情况;姬昌辉等^[5]采用物理模型试验方法研究壅水特性,为工程设计及防洪影响评价提供一定参考;孙东坡等^[6]通过概化模型试验研究了斜交桥的壅水特性,指出斜交桥墩阻水宽度需根据交角进行修正;何贞俊等^[7]和张金明等^[8]建立宽水槽模型,进行降低桥墩壅水的体型优化试验研究。物理模型虽能较为直观地反映桥梁壅水形态,但因其建模时间长,场地需求难以满足,越来越多的学者采用数值模拟方法进行相关研究。何家伟^[9]、燕琴等^[10]、邓显羽等^[11]应用HEC-RAS模型模拟了不同频率洪水下桥梁壅水高度以及壅水长度,较为精确地得出各断面水位变化情况;王彩虹等^[12]分别通过采用FLUENT及二维数学模型分析了不同桥墩概化方法得到的壅水值,认为等阻水面积概化法更能准确反映壅水情况;解鸣晓等^[13]建立了二维数值水槽模型,探讨了桥墩壅水值对糙率及紊动黏性系数的敏感性,结果显示紊动黏性系数的变化对壅水的影响更明显;何传凯^[14]则采用数学模型分析了不同体型桥墩对水流的影响,认为对方形墩进行倒角优化或采用圆端形墩,可显著减小桥墩对水流造成的不利影响。

对于大跨度桥梁,虽然其桥墩数量总体会有所减少,但在主墩尺寸增加的前提下,桥梁的总体阻水比不会出现明显下降。阻水比作为涉水桥梁的控制性指标,可以直观地反映桥梁对河道水流的影响程度。桥墩阻水比相同条件下,不同的桥墩尺寸和组合方式也在河道阻水效应方面产生一定差异。本文通过MIKE21水动力数值模拟软件建立了矩形数值水槽,在不考虑冲淤影响的情况下模拟相同桥墩阻水比条件下,不同桥墩尺寸和组合方式产生桥墩阻水效应,分析对比各种工况对矩形数值水槽的水动力影响程度,为桥梁工程设计和防洪评价计算提供参考依据。

1 水流运动数学模型

1.1 模型设置

建立的矩形定床数值水槽如图1所示,水槽形

状为长2 000 m、宽200 m的矩形,建立以上游水槽进口右边界端点为坐标原点的平面直角坐标系, x 轴为水槽右边界, y 轴为水槽进水口断面。桥墩型式采用矩形单排墩,以上游面为基准与水流方向正交等距布置于 $x=1\ 400$ m断面上。3种桥墩群的组合方式如表1所列,桥墩总体阻水比均为10%,单墩迎水面宽度分别为1 m、2 m、4 m,桥墩顺水流方向长度均为4 m。水槽上游来水的流量设置为 $1\ 500\text{ m}^3/\text{s}$,下游水位设置恒定值为0 m,数值水槽静水深为5 m。试验方案具体参数见表1。

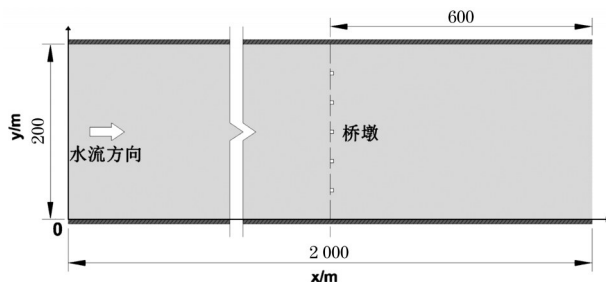


图1 水槽平面示意(单位:m)

表1 试验方案具体参数

桥墩方案	桥墩尺寸 (宽/m×长/m)	桥墩 数/个	桥墩中心 间距/m	阻水比/%
1	1×4	20	9.524	10
2	2×4	10	18.182	10
3	4×4	5	33.333	10

1.2 控制方程

模型是基于三向不可压缩和Reynolds值均布的Navier-Stokes方程,并服从于Boussinesq假定和静水压力的假定,在此不考虑源汇项推导二维非恒定浅水方程组,再结合连续性方程和动量方程,由沿水深平均的速度梯度用涡流黏性方程得出不同方位的侧向应力 $T_{ij}(\text{m}^2/\text{s}^2)$,其计算式为

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}, \quad T_{xy} = A \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right), \quad T_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \quad (1)$$

式中: T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yy} 为侧向应力, m^2/s^2 ; x 、 y 为笛卡尔坐标系坐标; \bar{u} 、 \bar{v} 分别为 x 、 y 方向上垂线平均流速, m/s 。

1.3 网格划分

模型采用非结构网格(三角形网格)进行划分,较四边形网格对复杂边界有更好的适应性。建桥后对桥墩内部网格进行挖空处理,并在桥墩周围进行局部加密,最小网格边长为0.2 m,距桥墩较远

的上下游处网格较大,最大网格边长为10 m。桥墩局部网格示意图2,不同方案下网格单元总量为28 000~36 000个。

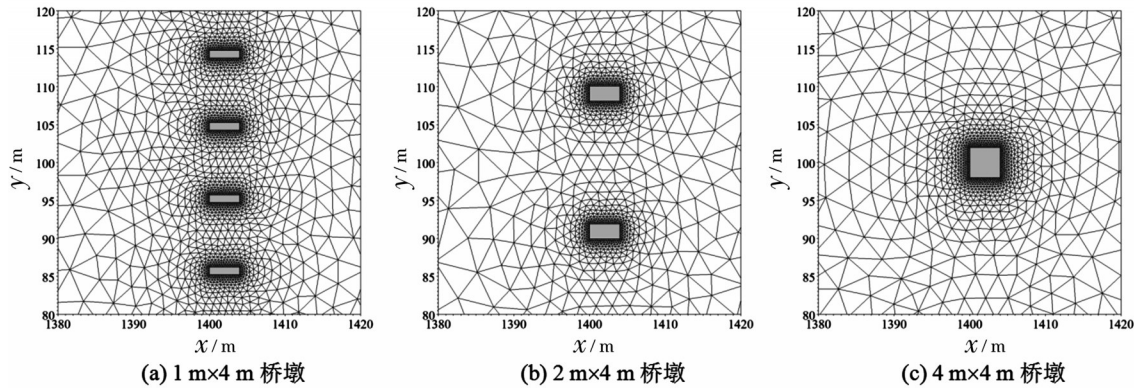


图2 桥墩局部网格示意

0.536 m,置于水槽中心,均匀流流速0.326 m/s,验证结果见图3。桩前垂线平均流速模拟结果与实测结果可以较好吻合,但对于桩后1倍桩径内的尾涡区域模拟不够精确,该数学模型可以用来计算桥梁对河道水流的总体影响。

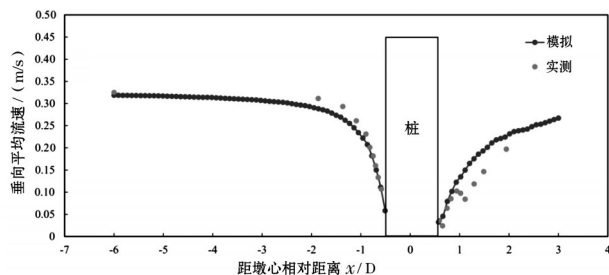


图3 垂向平均流速验证

对于桥墩附近的水位壅高 ΔZ , Roulund^[15]提出水的惯性力与重力之比 Fr 较小时可按下式计算: $\Delta Z = 0.5Fr^2D$,其中 D 为桩径,利用上述水槽在不同 Fr 的条件下进行壅水验证,计算条件见表2,验证计算结果见图4,可知二维水力数值模型可以基本反映桩柱外侧大范围的水位变化。

表2 壅水验证计算条件

序号	水深 H / m	均匀流速 v / (m/s)	桩径 D / m	Fr
1	0.54	0.326	0.536	0.141640
2	2.50	0.900	0.536	0.181735
3	6.00	1.540	0.536	0.200729
4	10.00	2.480	0.536	0.250390

1.4 模型验证

采用Roulund^[15]水槽试验资料对数学模型进行检验以验证模型有效性,水深0.54 m,圆桩直径

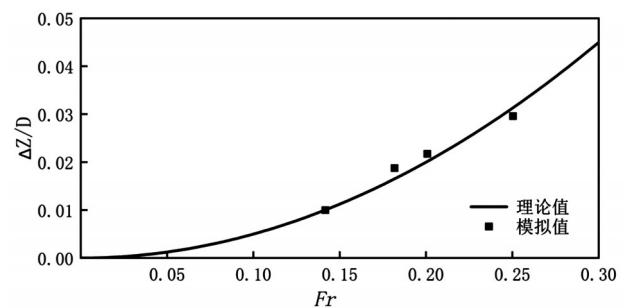


图4 壅水高度验证

2 桥墩壅水效应数值模拟

2.1 桥墩附近流场分析及流速变化

图5显示了不同桥墩方案下的桥墩附近流场分布情况。可以看出,行近水流受到桥墩阻碍后转向桥墩侧边流动,桥墩两侧水流发生分离,在主流边界与桥墩之间不断产生的尾流漩涡被水流带往下游,形成较大的漩涡区域。随着桥墩尺寸的增大,桥墩边界水流分离程度呈加剧趋势,下游尾涡区域强度变大,且影响范围明显增大,其长度在2到3倍墩宽左右。

桥墩阻碍了上游水流的行近,并且压缩其所在断面过流面积,在桥墩附近会出现剧烈的流速变化现象,桥墩下游水流又逐渐恢复至天然流态^[16]。对不同桥墩放置方案的水流流速场进行对比,得到如图6所示的桥墩附近流速场变化图。

对比分析可知,桥墩的迎水面和背水面是流速减小区域,桥墩两侧的局部区域则是流速急剧增加

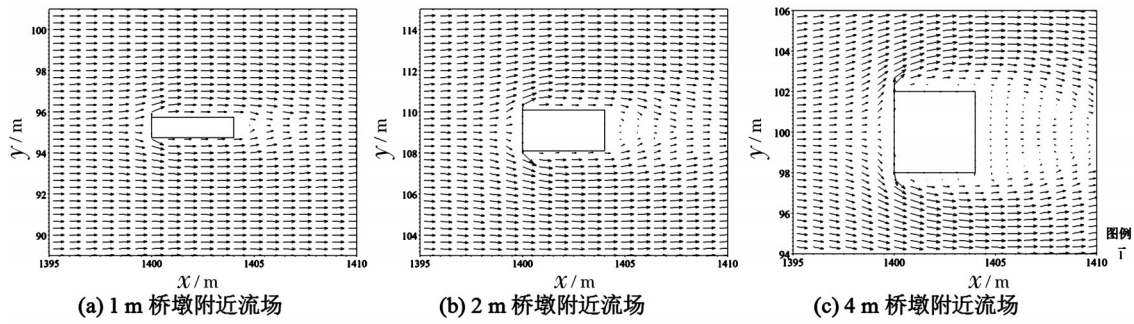


图5 桥墩周围流场示意

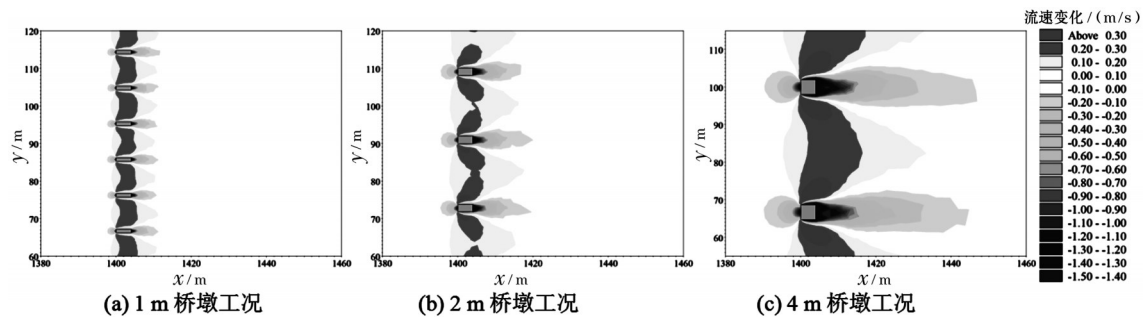


图6 墩周流速变化

的区域,两个距离较近的桥墩产生的流速增加区会发生重叠现象。对于布置最为紧密的1 m桥墩方案,流速增加0.2 m/s以上的区域,在相邻的桥墩区域并没有出现重叠现象,而其余2方案均出现了流速增加0.2 m/s以上区域的重叠现象。在4 m桥墩方案中,桥墩引起的流速增加范围更为显著,且相邻墩之间的流速增加区域有重合。统计流速变化值(表3)可知,流速最大增量随墩宽增加而增大,流速最大减小量则与墩宽无明显关系。

表3 流速变化统计

桥墩尺寸 (宽/m×长/m)	流速变化统计/(m/s)	
	最大流速增加量	最大流速减小量
1×4	0.38	-1.45
2×4	0.51	-1.45
4×4	0.62	-1.45

单个桥墩尾流区大小以及同幅度流速变化区域大小均与墩宽的平方近似呈正比关系,又与同阻水比条件下桥墩个数与墩宽成反比,故不同工况下桥墩尾流区、同幅度流速变化区的总面积与墩宽成正比例关系,大尺寸的桥墩产生的大型尾部涡流区及流速变化较大的区域所占河道的比例也较大,这会对河道通航条件产生不利影响。

2.2 桥墩附近水位壅高分布规律

在对桥墩壅水问题的研究中,常考虑墩前水流冲高与桥前平均壅高2个指标。桥墩阻碍水流运动,水流在墩前形成冲击水柱,并在桥墩上游及其两侧产生斜向水波,桥墩前面的水流冲击高度,称为桥墩冲高,桥前平均壅高即为垂直水流方向断面上壅水高度的平均值。图7为4 m尺寸桥墩附近水位壅高分布图,分析可知桥墩周边水位的变化具有如下特点。

沿墩中心线、相邻桥墩中轴线及近岸顺流向水面线分布规律不同。墩前水位急剧壅高,桥墩冲高最大可达12.7 cm,但其影响范围较小,壅水高度在6 cm以上的区域顺水流方向仅1倍墩长,垂直水流

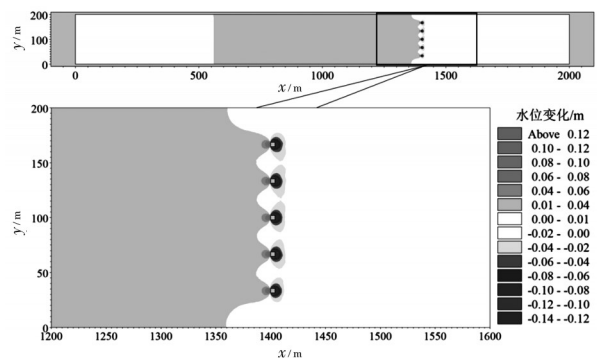


图7 4 m桥墩水位壅高分布

方向不足2倍墩宽。邻墩轴线区域及近岸区域水位受桥墩影响较小,桥墩上游水位壅高,下游水位跌落,壅水范围远大于跌水范围。

2.3 桥墩迎水面宽度对墩前冲高的影响

实际桥梁工程运行中所出现的最大水位变化在冲高处产生。受墩前水流冲高影响,桥墩附近的水位壅高值分布较为复杂。在阻水比10%的情况下,不同尺寸桥墩墩前0.5 m、4 m、16 m断面,即 $x=1\ 399.5$ 、 $x=1\ 396$ 、 $x=1\ 384$ 断面内水流壅高值分布规律如图8所示。分析可知,同断面壅水高度值与单个桥墩宽度成正相关;顺水流方向单位距离上壅水高度减小幅度随桥墩尺寸的增加而减小,即随着过水断面远离桥墩,小桥墩壅水高度减小速度更快,壅水对上游的影响范围更小。

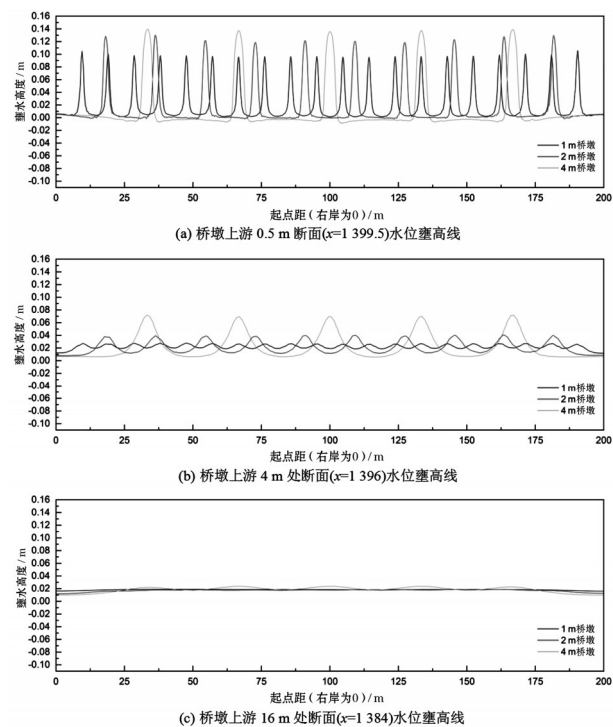


图8 墩前断面水位壅高分布

4 m宽桥墩墩前断面水位壅高值分布如图9所示。可以看出,墩前断面水位变化最大值随着到桥墩距离的增加而减小,且远离桥墩的断面水位壅高

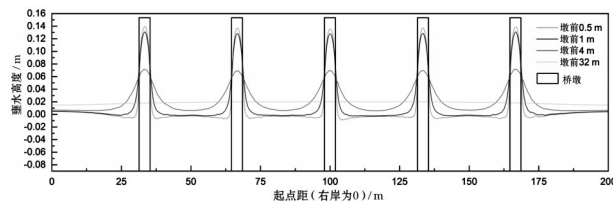


图9 4 m桥墩上游断面水位壅高线

分布逐渐均匀,但靠近两岸处的水面壅高增大。各尺寸桥墩墩前8倍墩宽(32 m)断面处水面已较为平坦,可认为此处墩前冲高影响已消失。

研究不同尺寸下墩前冲高的影响范围,以同一断面水位壅高值标准差与平均值的比值 C_v 作为判断墩前冲高影响范围的标准,称变异系数。以 $C_v=0.05$ 作为界限,当 $C_v<0.05$ 时,表明断面不受墩前冲高影响。图10中给出了不同尺寸桥墩工况下,变异系数 C_v 随断面相对桥墩位置的变化趋势,表4给出了变异系数小于5%的临界断面与桥墩的距离 L_c ,以及墩前绝对冲高值 H_0 和相对冲高值 $H_c(H_c=H_0/B)$ 。分析可知,临界断面与桥墩上游面的距离 L_c 随桥墩尺寸增加而增加,即墩前冲高的影响范围随桥墩迎水面尺寸增大而扩大,因此在相同阻水比条件下,尺寸小、数量多的桥墩组合方案,墩前冲高的影响范围更集中于桥墩附近,对河道横向水面的影响相对较小。

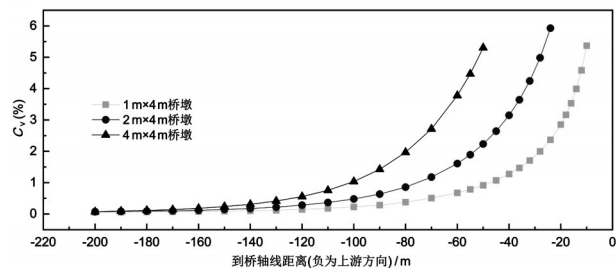


图10 墩前冲高变异系数 C_v (临界值5%)

表4 各桥墩尺寸下墩前冲高影响

桥墩尺寸(宽/m×长/m)	$C_v/\%$	L_c/m	H_0/m	H_c
1×4	5	10.4	0.116	0.1160
2×4	5	27.0	0.121	0.0600
4×4	5	49.8	0.127	0.0318

2.4 桥墩尺寸对桥前平均壅高的影响

在涉水桥梁防洪评价中,为保障桥梁所在河段两岸堤防安全,桥前断面平均水位壅高通常较墩前冲高更具有实际意义。图11为不同宽度桥墩布置下断面平均壅高分布,通过对比可以得出,桥墩对下游近15 m内断面平均水位的影响随桥墩尺寸增加而增加,但桥墩上游断面平均壅水高度与桥墩阻水宽度呈正相关关系,4 m尺寸桥墩平均壅高最大,2 m尺寸桥墩次之,1 m尺寸桥墩最小,最大平均壅高变化值为1 mm,变幅约10%。此外,桥墩下游形成局部跌水,最大跌水出现位置随桥墩尺寸增加而向下游移动,跌水深度与桥墩尺寸成正相关关

系。桥墩下游跌水的影响范围远小于上游壅水,在桥墩下游 50 m 处,4 m 桥墩水面线与天然水面变化在 1 mm 左右,可忽略不计,大于 50 m 后基本一致。

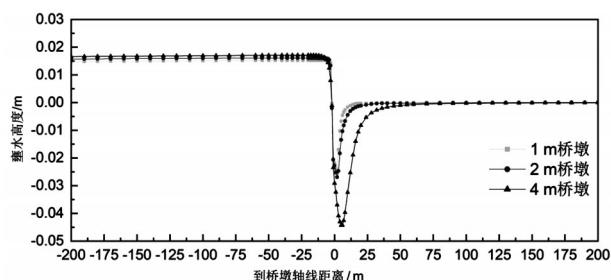


图 11 不同尺寸桥墩断面平均壅水高度对比

3 结 论

本文采用数学模型对矩形数值水槽内同一阻水比条件下,桥墩群不同组合方式进行了水动力运动数值模拟,通过对比分析可得出如下结论。

(1)桥前水位壅高和墩前水流冲高是桥墩壅水效应判别的 2 个指标,墩前水流冲高影响范围集中在桥墩前及临近水域,桥前水位壅高是对桥墩上游河道断面总体水位的影响,此对河道防洪安全影响较大。

(2)单个桥墩形成的流场及流速变化幅度与桥墩阻水宽度呈正相关关系,桥前水流冲高随桥墩尺寸增大而增大,文中所列 3 种工况所得冲高最大相差 9.3%,墩前水流冲高影响范围与变幅同桥墩迎水宽度基本呈线性增加关系。

(3)桥前整体水位平均壅高和下游跌水受桥墩尺寸影响,同阻水比下采用宽度较小、数量较多的桥墩,其总体的阻水效应要小于尺寸大、数量少的桥墩方案,文中所列工况平均壅水高度最大变幅为 10%。

(4)在实际工程中,在保证一定的桥梁跨度以满足通航需求的情况下,适当采取大小尺寸桥墩结合的设计,可以在减小建造成本及难度的同时获得

良好的水力特性。

参考文献:

- [1] 河北省交通规划设计院. 公路工程水文勘测设计规范: JTG C30—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015.
- [2] 中交公路规划设计院. JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京:人民交通出版社,2015.
- [3] 王开,傅旭东,王光谦. 桥墩壅水的计算方法比较[J]. 南水北调与水利科技,2006(6):53-55.
- [4] 张慧,黎礼刚,郑文燕,等. 武汉河段二七路长江大桥河工模型试验研究[J]. 人民长江,2008(1):57-58.
- [5] 姬昌辉,洪大林,谢瑞,等. 秦淮河地铁桥物理模型试验研究[J]. 水利水运工程学报,2012(1):71-77.
- [6] 孙东坡,杨苏宁,宋永军,等. 公路斜交桥壅水特性[J]. 水利水运工程学报,2007(1):41-46.
- [7] 何贞俊,张金明,何用,等. 降低桥墩壅水的优化试验研究[J]. 人民长江,2015,46(23):55-59.
- [8] 张金明,王海锋,王建平. 减少涉水桥梁桥墩阻水影响的体型优化研究[J]. 人民珠江,2016,37(6):62-65.
- [9] 何家伟. HEC-RAS 模型在桥墩壅水计算中的应用[J]. 水利技术监督,2022(2):163-165.
- [10] 燕琴,牛娇. HEC-RAS 模型在桥墩壅水计算与影响分析中的应用[J]. 江西水利科技,2017,43(1):38-41.
- [11] 邓显羽,李文枫. HEC-RAS 模型在密江特大桥防洪评价中的应用[J]. 南水北调与水利科技,2012,10(1):139-141.
- [12] 王彩虹,程雪,卢少为,等. 阻水建筑物在河流数值模拟中的概化方法研究[J]. 水电与新能源,2022,36(5):25-29.
- [13] 解鸣晓,张玮. 桩墩影响下的水动力数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2008(3):20-24.
- [14] 何传凯. 不同桥墩结构形式对通航水流条件的影响研究[J]. 广东水利水电,2020(7):73-77.
- [15] ROULUND A, SUMER B M, FREDSOE J, et al. Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile[J]. Journal of Fluid mechanics, 2005, 5(34): 351-401.
- [16] 陈秉如,冀鸿兰,高鹏程,等. 冰盖下组合桥墩的局部冲刷特性及水力特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 53-60, 68.