DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.04.003

薛万云,郭宁,吴时强,等.桥墩水流特性大涡模拟研究[J].水利水运工程学报,2016(4):18-26.(XUE Wan-yun,GUO Ning,WU Shi-qiang, et al. Impacts of multiple bridge piers upon open channel flow based on LES [J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(4):18-26.)

桥墩水流特性大涡模拟研究

薛万云¹,郭 宁²,吴时强¹,陈锡林²,吴修锋¹,周 杰¹,周向华²,戴江玉¹ (1. 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; 2. 江苏省水利 厅,江苏南京 210029)

摘要:采用大涡模拟(LES)数学模型对河道中单个桥墩及3个桥墩条件下的水流运动进行数值模拟。计算结果与试验结果吻合良好。对计算得到的墩前及墩后流速变化、水位变化、剪应力分布、涡量变化及频谱进行分析,基于以上分析发现:桥墩间距较窄时(s/D=2),墩前不同位置(0>x/D>-5)处的垂向流速绝对值|U₂|大于其他工况条件下相同位置处的流速,而在墩前 x/D< -5 区域,各计算工况条件下的垂向流速 U₂基本为零,不受桥墩阻流的影响,两侧桥墩叠加效应最明显,跌水达最大值;桥墩间距较大时(s/D>5),中心桥墩两侧的桥墩对中心桥墩尾流区的干扰减弱,叠加效应可以忽略。桥墩间距较窄时(s/D=2)墩后 x=0.5D 处计算得到的涡漩特征长度与3 倍的桥墩直径—致,中心桥墩后 x=5D 处的涡漩由 3 个桥墩叠加产生。

关 键 词:多桥墩;大涡模拟(LES);剪应力;涡量;频谱分析 中图分类号:TV133 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-640X(2016)04-0018-09

桥墩水力特性一直是明渠水力学研究中的经典问题,桥墩周围产生不同形式的涡漩,使得桥墩附近的流场结构十分复杂。国内外学者采用理论分析,物理模型试验和数值模拟等手段对桥墩附近壅水、流场结构及冲刷机理等进行了深入细致的研究,并取得了丰硕的研究成果^[1-3],如 A. Jahangirzadeh 等^[2]基于大量试验,对桥墩附近的流场和冲刷机理进行了分析;A. Chrisohoides 等^[3]通过物理模型试验和理论分析对桥墩附近复杂的三维流场和河床冲刷过程进行深入分析,并提出了相应的防护措施。

桥墩在河道中一般以桥墩群的形式存在,桥墩间距小到一定程度后,桥墩间产生叠加效应,对水流流动 方向、流场结构等造成新的影响。Lu Jing 等^[4]建立了相同压缩比情况下单排和双排桥墩模型,对比分析了 桥墩群对水流结构的影响,认为相同压缩比条件下,最大流速出现在前排各桥墩两侧,与水流方向夹角在 70°~90°范围内,且桥墩群周围最大流速的大小与桥墩的布置间距有关。王庆珍等^[5]应用大型流场分析软 件 FLUENT,耦合求解桥墩附近三维流场,并得出剪应力的分布特征,指导河床冲刷分析及制定合理的防护 措施。谢鸣晓和张玮^[6]利用平面二维水流数学模型分析研究了缓流河道中单排桥墩影响下水位和流速变 化,对比了方墩和圆墩对水流变化的影响差异,研究发现桩墩引起的水流变化沿纵、横向呈现出不同的分布 规律,沿横向呈波状分布,方墩对水流变化的影响比圆墩大;G. Abouzeid 等^[7]采用室内水槽试验和三维数学 模型研究了两个桥墩(群)对水流流动结构、桥墩周遭冲刷的影响,发现桥墩底部最大冲刷坑深度与弗劳德 数、桥墩间距和桥墩直径有关,并得到表述以上参数的经验公式。邓见等^[8]通过数值模拟计算得到了单圆 柱、不同间距下串列双圆柱的绕流阻力系数,并用室内试验进行了验证。然而数值模拟方法更多采用平面二

收稿日期: 2015-06-27

- **基金项目:**国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2012ZX07506-003-04);国家自然科学基金资助项目 (51379128);国家自然科学青年基金资助项目(51409165)
- 作者简介:薛万云(1986—),男,青海西宁人,博士,主要从事水力学及河流动力学方面研究。E-mail:wyxue@nhri.cn

维及传统的两方程数学模型,这类方法基于时间平均理论,忽略了湍流的瞬时流场结构变化及其他湍流内的 重要信息。对于高雷诺数的湍流,由于湍流脉动的多尺度性,湍流具有很宽的尺度范围,计算难度极高,于是 提出了一种折中的数值模拟方法,即湍流的大涡数值模拟(LES)^[9-10]。

本文利用大涡模拟(LES)数学模型,研究不同横向间距条件下桥墩对水位变化、水流紊流结构和涡量等 参数的影响规律,对比分析了多个桥墩与单个桥墩的差异,研究成果可为多桥墩的防洪影响评价提供技术支 持和参考依据。

数学模型 1

大涡模拟(LES)方法把湍流流动分为大尺度涡和小尺度涡两种运动,大尺度运动直接进行计算,而小尺 度对大尺度运动的作用可以建立相应的模型。因此大涡模拟的第一步就是将全部的流动变量分为可以直接 计算的大尺度脉动和不直接计算的小尺度脉动,这一过程称为滤波。滤波是一种数学计算,通过滤波函数将 小尺度脉动过滤掉。目前较为常用的滤波函数有:高斯(Gauss)滤波函数、富氏截断滤波函数和 Deardorff 的 盒式(Box)滤波函数^[10]。

1.1 控制方程

将滤波函数作用于 Navier-Stokes 方程的各项,得到过滤后的湍流控制方程组,即连续方程(1)和动量方 程(2):

$$\partial \bar{u}_i / \partial x_i = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$
(2)

式中: x_i 和 \bar{u}_i 分别为i方向(i=1, 2, 3)上过滤后的坐标及速度; \bar{p} 为过滤后的压力; μ 为动力黏度;亚格子应 力(the subgrid scale stress) τ_{ii} 反应小尺度涡漩运动的影响。

1.2 Smagorinsky-Lilly 动力模式

本文采用 Smagorinsky-Lilly 动力模式求解亚格子应力 τ_{ii} ,在计算过程中动态获得模型系数,而不是给一 个先验定值。模型中引入两个过滤因子,网格过滤因子 Δ 和检验过滤因子 $\overline{\Delta}$,一般选取的检验过滤因子是网 格过滤因子的2倍。然后利用涡黏性模型对亚格子应力参数化处理^[10]:

$$\tau_{ij} - \delta_{ij}\tau_{kk}/3 = -2C\overline{\Delta}^2 |\overline{S}|\overline{S}_{ij}$$
(3)

式中: $\bar{S} = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}$; $\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2}(\partial \bar{u}_i / \partial x_j + \partial \bar{u}_j / \partial x_i)$; δ_{ij} 为 Kronecker delta; $\bar{\Delta} = 2\Delta$; C 为模型常数且认为在两个过 滤因子间不变^[11],利用 D. K. Lilly^[11]的最小二乘分析方法计算 C 值, C 值在各个方向上做平均: (

$$C = L_{ij}M_{ij}/(2M_{ij}M_{ij})$$
(4)

式中: $L_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u}_i \overline{u}_i$ 利用计算得到的大涡流场计算^[12], $M_{ij} = -2(\overline{\Delta}^2 | \overline{\overline{S}} | \overline{\overline{S}}_{ij} - \Delta^2 | \overline{\overline{S}} | \overline{\overline{S}}_{ij})$ 。大涡模拟数学模型的 详细信息可参阅 M. Germano 等^[11]和 J. Smagorinsky^[9]的相关论述。

计算区域和计算方法 2

2.1 计算区域

本次数值计算以 B. W. Melville 等^[13]的试验为原型,为了验证模型的适应性,计算区域也与原型一致。 计算明渠长 7 m, 宽 1.5 m, 高 0.35 m, 桥墩布置在明渠中心。x, y, z 分别为水流纵向、横向和垂向, 速度分别 是 U_x, U_x和 U_z,坐标系原点设置在桥墩中心处,计算条件见表 1。分别对单墩工况及 5 组不同墩间间距 s/D 的3个桥墩工况(s/D=2,3,5,6,8)进行数值计算。图1给出了计算区域示意图及4种典型桥墩布置的 工况。

表 1 计算条件 Tab. 1 Computation conditions							
定床	0. 089	0. 081	0. 182	0. 292 7	4. 3×10 ⁴	0. 22	0.02







2.2 边界条件及数值计算方法

图 1(a)为计算边界条件,水流进口设置为速度进口边界条件,湍流强度为 I=2%,在进口边界流速分布 呈均匀分布;水流出口采用压力出口边界条件;计算区域顶部采用对称边界,在该边界法向方向上,流速及各 变量梯度为零;其他边界均采用无滑移壁面边界条件。

整个计算区域划分为 300 万个结构化网格单元,主槽区域在 x, y, z 方向上的网格数为 500×150×40,在 水流进口、近壁区及桥墩所在区域进行局部网格加密(图1(b)),加密区域的最小网格尺寸是 2 mm。

本文采用 VOF 方法处理求解控制方程过程中遇到的自由表面问题^[14],运用有限差分法离散控制方程。 采用 FAVOR 方法^[15]识别计算区域内的几何实体(桥墩)。

采用有界中心差分格式^[16]求解对流扩散方程。瞬态项计算采用二阶隐式方法,时间步长 0.001 s。所 有方程的相对残差小于 1×10⁻⁵时认为计算已达到收敛。每个工况计算 200 $T_{o}(T_{o}=L_{o}/U_{o},L_{o}$ 为计算区域长, U_{o} 为上游进口来流时均流速),为避免初始条件对结果的影响,本文统计数据的时间范围为 150 $T_{o} < t < 200 T_{o}$ 。

3 结果讨论

3.1 验证计算结果分析

图 2 为墩前桥墩纵向中心线上不同位置处(x/D=-2.25,-10.0)的沿垂向流速计算结果与 B.W.

Melville^[13]试验结果比较, U_x为纵向流速, U_x为垂向流速。从图 2 可见, 纵向流速 U_x计算结果与试验结果吻 合基本良好, 垂向流速 U_x在 z/H≥0.15 区域, 计算值与试验值基本吻合, 而在近床面区域(z/H<0.15)计算值 与试验值差别较大, 这是由于计算时假设床面为无滑移壁面且所采用的 Smagorinsky-Lilly 动力模型无法捕捉 床面附近的猝发扫掠现象所致。



Fig. 2 Validation of velocity in front of bridge pier

3.2 流速分布分析

图 3 是不同工况下中心桥墩墩前纵向中心面上不同位置处沿水深纵向流速和垂向流速变化。从图 3 (a)可以看到,在桥墩上游,离桥墩越近,桥墩对水流的阻水效应越明显,纵向流速 U_x越小。工况 s/D=5 条件下的纵向流速 U_x与单墩的纵向流速基本一致,说明桥墩横向间距 s/D>5 时,桥墩间的相互影响基本可以忽略。工况 s/D=2 和 3 条件下,在墩前 x/D=-1 和-5 处的纵向流速 U_x均小于单桥墩工况下的相应纵向流速,说明中心桥墩墩前流速受到两侧桥墩的叠加效应影响,使中心桥墩墩前水位较单墩条件下的流速有所减小。从图 3(b)可以看到,当墩前 x/D=-1 处,垂向流速 U₂在近水面区域以下(z/H<0.93)均为负值,表明在墩前中心纵断面上存在下潜流,而在近水面区域(z/H≥0.93),垂向流速 U_z为正值,说明水流在墩前受桥墩作用分为两股,一股为流向水面的上升流,另一股为流向河道底部的下潜流。工况 s/D=2 条件下的不同墩前位置处的垂向流速绝对值[U_z]大于其他工况条件下的相同位置的流速,表明受桥墩叠加效应的影响,墩前下潜流流速增大,这种下潜流对桥墩底部河床造成冲刷。近水面区域,受逆压梯度和涡流循环方向的综合影响,垂向流速 U_z基本为零,说明在墩前 x/D=-5 区域,流速基本不受桥墩的阻流影响。





Fig. 3 Variation of velocities in front of bridge pier at different water depth

图 4 为不同工况下中心桥墩墩后纵向中心面上不同位置处沿水深纵向流速和垂向流速变化。从图 4

(a)可以看到,在墩后 x/D=1 处,水流受桥墩阻流影响,流速减小。单墩墩后 x/D=1 处,近壁面区域(z/H< 0.15)和近水面区域(z/H>0.53)纵向流速 U_<0,说明在此区域中存在回流现象;在水深 0.15 <z/H<0.53 范 围内 U_>0,在此区域不存在回流。工况 s/D=5 条件下的墩后纵向流速与单墩条件下的流速大小和变化趋 势最接近。这表明随着横向间距的增大,桥墩间的相互影响逐渐减弱,桥墩叠加效应逐渐消失,类似于3个 独立的单墩圆柱绕流。图 4(b)显示在近河底壁面处垂向流速 U 为负值,说明在此区域存在下潜流;工况 s/D=5的垂向流速 Uz与单墩条件下的垂向流速大小接近且变化趋势一致,说明桥墩横向间距 s/D>5 时,桥 墩间的相互影响基本可以忽略;工况 s/D=2条件下的垂向流速 U₂较单墩条件下的垂向流速大,说明桥墩横 向间距 s/D=2 时,桥墩间的叠加效应明显。





3.3 水面线分布分析

不同工况条件下桥墩中心纵断面水位变化见图 5。从图 5 可得,受桥墩阻水作用,墩前出现明显壅水现 象,受两侧桥墩叠加效应的影响,水流在离桥墩较远处开始壅高,且水位高于单墩时。在工况 s/D=2 条件 下,两侧桥墩叠加效应最明显,壅水达最大值,在工况 s/D=5 条件下,桥墩叠加效应减弱,水位壅高与单墩条 件下的水位壅高基本一致,说明桥墩间距 s/D>5 时,桥墩间相互影响可以忽略。受桥墩的滞水作用影响,墩 后尾流区出现强涡漩(卡门涡街),水位迅速下降出现跌水现象,工况 s/D=2条件下,两侧桥墩叠加效应最明 显,跌水达最大值,而在 s/D=5条件下的墩后跌水值变化曲线与单墩条件下的跌水值变化曲线基本相同,说 明桥墩间距 s/D>5 时,桥墩间的叠加效应减弱,甚至可以忽略。图 6 是不同桥墩间距 s/D 值条件下,中心桥 墩前后水位差Δh 随 s/D 值的变化,其中认为单墩工况时 s/D 值非常大,取 s/D=15。从图 6 可见,中心桥墩 前后水位差Δh 随 s/D 增大而减小,说明多个桥墩叠加效应随 s/D 增大而减弱直至消失。式(5)可以用来表 达中心桥墩前后水位差Δh 随 s/D 值的变化规律:



Fig. 5 Variation in water level along longitudinal profiles of central bridge pier

Fig. 6 Variation in waterhead in front of and behind central bridge pier

3.4 剪应力分布

图 7 为桥墩底部剪应力分布,单墩条件下(图 7(a)),最大剪应力为 0.04 Pa,位于迎水面中心线两侧约 45°位置。s/D=2 时(图 7(b)),桥墩间叠加效应明显,桥墩周遭区域剪应力增大,最大剪应力为 0.05 Pa,比 单墩条件下最大剪应力增大 25%,最大剪应力发生位置也有所变化,位于迎水面中心线两侧约 48°位置,桥墩背水面也出现两个剪应力较大的区域。由图 7 可见,相对于单墩情况,工况 s/D=2 条件下冲刷深度和范围均将增大,受两侧桥墩的叠加效应影响,对桥墩的冲刷将加剧。



图 7 中心桥墩剪应力分布(单位:Pa) Fig. 7 Shear stress distribution around central bridge pier(unit: Pa)

3.5 涡漩结构分析

瞬时涡量场可以用来反映墩后尾流结构。图 8 为计算得到的单墩工况和 s/D = 2 时工况对应的瞬时涡量场(红色代表正涡量场,蓝色代表负涡量场)。紧靠桥墩两侧的涡量场呈现两条明显带状结构,涡量场比较稳定,下游一定距离后,涡量场开始变得不稳定,卡门涡街出现。随着涡量场继续往下游发展,卡门涡街强度逐渐减弱。从图 8(b)可明显看到,水流受桥墩间相互影响,墩后叠加效应明显,桥墩产生的涡量场在墩后约 5 倍桥墩直径处叠加融合。



Fig. 8 Distribution of vorticity field (z=H/2) (unit: s⁻¹)

为了更好说明各种涡漩作用,采用频谱分析对紊动强度中心位置对应的瞬时流速序列进行分析,将测量的时域信号转化为频域信号。频谱分析得到的信息能更好地描述信号功率或强度、能量等随频率的变化(功率主要指基于流速信号的平方值)。频谱分析采用 Matlab 提供的 Welch 方法^[17]。参考涡量场模拟分析,频谱分析选定 *s/D*=2 工况(*D*=0.089 m)。

功率谱密度图(图 9)描述了功率谱密度随频率的变化,其峰值对应的频率可看做涡漩的主导频率。对

s/*D*=2 工况,紊动强度在中心桥墩后 *x*=0.5*D* 处频谱图对应的主导频率为 0.69 Hz(图 9(a));紊动强度在 中心桥墩后 *x*=5*D* 处频谱图对应的主导频率约为 0.22 Hz(图 9(b))。紊流理论表明:涡漩的频率越高,其 对应的特征长度越小。紊动强度在中心桥墩后 *x*=0.5*D* 处对应的涡漩特征长度应明显小于 *x*=5*D* 处对应的 涡漩特征长度。



Fig. 9 Spanwise velocity spectra $S_{ev}(s/D=2, z=H/2)$

斯特劳哈尔数(Strouhal number) S_i 常用来描述实体圆柱后涡漩频率和特征长度的关系^[18]:

 $S_t = f L/U (S_t \approx 0.2, 250 < Re < 10^5)$

(6)

式中:f为涡漩脱落频率,即频谱分析对应的主导频率;L为涡漩特征长度;U为特征流速,计算水流 Re 数满 足公式适用条件(Re=4.3×10⁴)。研究圆柱绕流时,L为圆柱直径,U为圆柱上游流速,f基于实测变量(压 强、流速等)通过频谱分析来确定。

对于 s/D=2 工况中心桥墩后 x=0.5D 处的紊动强度峰值,涡漩脱落频率为0.69 Hz,特征流速采用流速 实测量,即进口流速 U_o,根据式(6)得到涡漩特征长度为0.084 m,涡漩特征长度基本等于桥墩直径(D= 0.089 m),说明该处涡漩主要由单个桥墩的尾流产生。对于 s/D=2 工况中心桥墩后 x=5D 处的紊动强度峰 值,主导频率为0.22 Hz,特征流速采用上游进口流速 U_o,得到涡漩特征长度为0.266 m,该特征涡漩长度与 3 倍的桥墩直径一致(3D=0.267 m),说明中心桥墩后 x=5D 处紊动强度峰值对应的涡漩由 3 个桥墩叠加产 生,即通常所说的桥墩间叠加效应。功率谱密度大小关系与两个位置对应的紊动强度大小关系一致。频谱 分析结果表明:两个紊动强度峰值分别由两种不同尺度的涡漩产生,紧靠桥墩末端的紊动强度由单个桥墩的 尾流引起,第 2 个紊动强度峰值由 3 个桥墩尺度的尾流引起。涡量场模拟结果也说明了这个现象。单个桥 墩引起的涡量出现在桥墩末端,很快消失,3 个桥墩下游较远距离,受桥墩叠加效应影响,流动受较大尺度的 卡门涡街影响,涡量呈现交替变化。

4 结 语

利用大涡模拟(LES)数学模型对明渠河道中单个桥墩及多个桥墩条件下的水流运动(Re=4.3×10⁴)进行数值模拟。对计算得到的桥墩前后水流流速变化、水位变化、剪应力分布、涡量变化及功能谱进行分析,得到如下结论:

(1)纵向流速 U_x计算结果与试验结果吻合良好;垂向流速 U_z在 z/H≥0.15 区域,计算值与试验值基本 吻合,而在近床面区域(z/H<1.5),计算结果与试验值差别较大,主要原因是计算时假设床面为无滑移壁面, 且所采用的 Smagorinsky-Lilly 动力模型无法捕捉床面附近的猝发扫掠现象。

(2)桥墩间距较窄时(s/D=2),桥墩叠加效应明显,墩前不同位置(0>x/D>-5)处的垂向流速绝对值|U_z| 大于其他工况条件下的相同位置处的流速,墩前下潜流流速增大,而在墩前(x/D<-5)区域,各计算工况条 件下垂向流速 U₂基本为零,流速基本不受桥墩的阻流影响;墩距较宽时(s/D=5),墩后垂向流速 U₂与单墩条 件下的垂向流速曲线基本吻合,说明桥墩横向间距 s/D>5 时,桥墩间的相互影响基本可以忽略,而墩距较窄 时(s/D=2)墩后垂向流速 U₂较单墩条件下的垂向流速大,说明桥墩横向间距 s/D=2 时,桥墩间存在叠加效 应,并且很明显。

(3)桥墩间距较窄时(s/D=2),两侧桥墩叠加效应最明显,跌水达最大值,而桥墩间距较大时(s/D>5), 中心桥墩两侧的桥墩对中心桥墩尾流区的干扰减弱,叠加效应可以忽略。中心桥墩前后水位差Δh 随桥墩间 距 s/D 增大而减小,式(5)可以用来表达中心桥墩前后水位差Δh 随 s/D 值的变化规律。

(4)桥墩间距较窄时(s/D=2),受两侧桥墩的叠加效应影响,桥墩周围的剪应力增大,桥墩冲刷深度和 范围均可能增大,桥墩冲刷加剧。

(5)对于桥墩间距较窄时(*s*/*D*=2)墩后 *x*=0.5*D* 处计算得到的涡漩特征长度与桥墩直径基本相同,说明该处涡漩主要由单个桥墩的尾流产生,而桥墩后 *x*=5*D* 处的涡漩特征长度与3 倍的桥墩直径一致,说明中心桥墩后 *x*=5*D* 处的涡漩由3 个桥墩叠加产生。

参考文 献:

- [1] AHMED F, RAJARATNAM N. Flow around bridge piers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 124(3): 288-300.
- [2] JAHANGIRZADEH A, AKIB S. Experimental study for determination of collar dimensions around bridge pier [J]. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 2015, 10(1): 89-96.
- [3] CHRISOHOIDES A, SOTIROPOULOS F, STURM T W. Coherent structures in flat-bed about-ment flow: computational fluid dynamics simulations and experiments[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129(3): 177-196.
- [4] LU Jing, WANG Xiang-dong, CHENG Chen, et al. Analysis of the flow field of the single-row and double-row of bridge piers [J]. Yellow River, 2013, 35(1): 115-119.
- [5] 王庆珍,李田生,官盛飞.圆柱形桥墩附近三维流场分析研究[J]. 公路交通技术, 2008(2): 47-50. (WANG Qing-zhen, LI Tian-sheng, GUAN Sheng-fei. Analysis of three dimensional stream fields around columnar piers[J]. Technology of Highway and Transport, 2008(2): 47-50. (in Chinese))
- [6] 谢鸣晓,张玮. 桩墩影响的水动力数值研究[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(3): 20-24. (XIE Ming-xiao, ZHANG Wei. Numerical simulation of open channel flow influenced by pile piers[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(3): 20-24. (in Chinese))
- [7] ABOUZEID G, MOHAMED H I, ALI S M. 3-D numerical simulation of flow and clear watersour by interaction between bridge piers[C] // Tenth International Water Technology Conference. Alexandria, Egypt, 2006: 899-915.
- [8] 邓见,黄钰期,任安禄.分块法研究圆柱绕流升阻力[J].力学与实践,2004,26(1):24-26.(DENG Jian, HUANG Yu-qi, REN An-lu. Domain decomposition method for the calculation of circular cylinder drag and lift in flows[J]. Mechanics and Engineering, 2004, 26(1): 24-26. (in Chinese))
- [9] CUI J, NEARY V S. LES study of turbulent flows with submerged vegetation [J]. Journal of Hydraulic Research, 2008, 46(3): 307-316.
- [10] SMAGORINSKY J. General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment[J]. Monthly Weather Review, 1963, 91(3): 99-164.
- [11] LILLY D K. A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method [J]. Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, 1992, 4(3): 633-635.
- [12] LIU S, MENEVEAU C, KATZ J. On the properties of similarity subgrid-scale models as deduced from measurements in a turbulent jet[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1994, 275: 83-119.
- [13] MELVILLE B W, TOEH A. Local scour at bridge sites [R]. Rep No. 117. Auckland: Dept of Civil Engineering, School of Engineering, University of Auckland, 1975.
- [14] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201-225.
- [15] KIM S D, LEE H J, AN S D, et al. Improvement of hydraulic stability for spillway using CFD model[J]. International Journal

of Physical Sciences, 2010, 5(6): 774-780.

- [16] LEONARD B P. The ULTIMATE conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1991, 88(1): 17-74.
- [17] WELCH P D. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms [J]. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, 1967, 15(2): 70-73.
- [18] BLEVINS R D. Flow-induced vibration M]. 2nd Ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.

Impacts of multiple bridge piers upon open channel flow based on LES

XUE Wan-yun¹, GUO Ning², WU Shi-qiang¹, CHEN Xi-lin², WU Xiu-feng¹,

ZHOU Jie¹, ZHOU Xiang-hua², DAI Jiang-yu¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing 210029, China)

Abstract: A large-eddy numerical model was used to simulate flow in a rectangular open channel blocked with a bridge pier or multiple bridge piers, focusing on effects of the bridge piers upon the flow characteristics and turbulent structures. Calculations were performed for six values of pier spacings s/D with same Froude numbers. The calculated results were compared well with previous laboratory results. And the variations in velocities, water levels in front of the central bridge pier and behind it and the vorticity were deeply analyzed based on the calculated results. Numerical simulation results show that for the closely spaced conditions (s/D=2), the absolute values of the velocity in vertical direction $|U_{i}|$ in the region (0 > x/D > -5) were larger than the one in the same region for other conditions. On the contrary, the velocity in vertical direction U_{z} in the region (x/D < 5) was almost zero and the bridge piers hardly affected the flow field; for the closely spaced conditions (s/D=2), the values of the hydraulic drop upstream and downstream of the central bridge pier were to be the maximum due to the duplicate effects given by the bridge piers; and for the widely spaced conditions (s/D>5), the effects caused by the bridge piers on both sides of the central pier in the wake area downstream of the central bridge pier became weaker and the duplicate effects given by the bridge piers could be ignored. The lengths of the vortices corresponding to the dominant frequency at different locations behind the central bridge pier were studied based on the spectral analysis and calculated vorticity. The length of the vortices at x = 0.5D was equal to a pier diameter (D), so that the vortices at x = 0.5D behind the central bridge pier were mainly caused by the wake downstream of a bridge pier; and the length of the vortices at x = 5D was equal to three times of the pier diameter (3D), so the vortices at x = 5Dwere caused by the duplicate effects given by the multiple bridge piers.

Key words: multiple bridge piers; large-eddy simulation (LES); shear stress; vorticity; spectral analysis