

基底宽度对石笼结构水毁影响分析

王 硕,吴媛媛,邱 燕

(1. 重庆交通大学 河海学院,重庆 400041;  
2. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室,重庆 400041)

**摘要:**石笼在山区桥梁建设中应用广泛但水毁频发。为研究石笼结构具体的水毁模式,通过模型实验加数值模拟来对河流泥沙的冲刷形态和水流场流进行分析。结果表明:较于双排网箱,三排网箱具有良好的耐冲性能。至失稳时间,三排基础网箱桥墩最大冲刷深度超出双排基础网箱桥墩 7.1%,最小冲刷深度超出双排网箱 13%;网箱的主要变化是产生了一定范围的沉降,这些沉降点集中于垂直水流方向的侧倾和沿 Z 轴方向,其沿水流方向(X 轴)产生的位移很小。

**关键词:**石笼桥墩;冲刷深度;模型试验;数值模拟

**中图分类号:**U466      **文献标识码:**A      **文章编号:**1671-5322(2018)01-0042-07

石笼在山区桥梁建设中应用比较广泛。相对于砖混结构污染大、成本高、施工复杂、施工要求高的特点,石笼结构具有建设成本低、施工简单、保护环境的优点。但在现实中,石笼虽应用广泛但水毁频发。根据现场勘察和部分相关实验研究,发现冲刷导致的局部失稳是造成此类基体破坏的主要原因。

许多学者针对桥体冲刷和失稳破坏方面进行了研究。梁锴等<sup>[1]</sup>通过有限元分析计算基底压应力和墩顶位移,得出当基底掏空超出 1/5 时,基体位移和基底应力都将超过安全值,桥墩整体会发生失稳现象。曲广琇等<sup>[2]</sup>应用弹性半空间地基模型分析了桥墩墩顶弹性水平位移和基底压应力随着基底冲刷面积的变化,得出结论:当冲刷面积比较小时,墩顶弹性水平位移最先到达临界值。

本文以重庆市某网箱石笼桥为例,运用模型实验和数值模拟的手段,探讨是否可以通过加宽基础来提高桥墩的稳定性,以及石笼桥墩抗冲刷水毁模式,并对其结构型式提出相关建议。网箱石笼桥梁状貌如图 1。

1 石笼桥墩模型试验

1.1 桥点及原型桥概况

原型桥点位于重庆市某山村,洪水期为每年

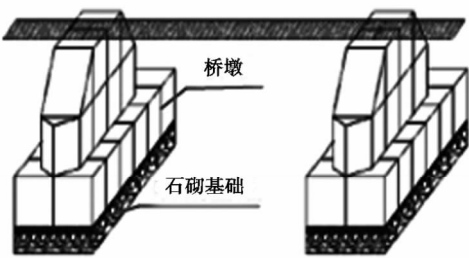


图 1 桥梁状貌图  
Fig. 1 Bridge appearance figure

6—8 月,河面常年高水位为 4.3 m,枯水期水面高度为 0.2~0.5 m,河宽 46~50 m,流速 0.3~0.7 m/s。河床主要由质地坚硬紧密的砂卵石构成;网箱通过填石形成桥墩,桥墩上部有预留孔洞,与位于乘搭主梁处的钢箱框架连接;顶部为了避免冲刷,在迎水面贴镀了尖形锌钢板。

根据调研资料分析,以往的网箱桥梁主要水毁部位为桥墩部位,其水毁破坏形式主要为失稳后的拉裂破坏。由于石笼墩体整体抗压性较强而抗拉性较弱,在设计时常常采用桥架与桥墩搭接形式。所以本文在实验和模拟的过程中不再考虑桥墩上部的横向荷载及弯矩,只探究石笼墩体的水毁模式并对扩大基础对石笼墩体失稳水毁的影响做出分析,探讨加宽桥墩基体宽度是否可以提高墩体整体稳定性。

1.2 网箱物理模型

根据原形观察、现场实验和资料证明,网箱整体失稳具有突发性。本次实验亦是根据此类性质通过耐冲刷(失稳)时间来验证加宽基础对网箱稳定的影响,并记录整个失稳过程,探究网箱墩体的失稳模式。因为原形单个石笼网箱的结构尺寸为 1 m×1 m×1 m,而实验设计几何比尺为 1:10,故将实验模型石笼网箱尺寸设置为 0.1 m×0.1 m×0.1 m。根据重力相似准则,确定设计模型的比尺和其他各比尺值,其中,试验模型速度比尺, $\lambda_v = v_p/v_m = [(g_p \times \Delta p \times l_p)/(g_m \times \Delta m \times l_m)]^{1/2}$ 。公式中: $v_p$ 、 $\Delta p$  和  $l_p$  分别指原型中的临界流速、石笼填充物相对水的密度和原型尺寸; $v_m$ 、 $l_m$ 、 $\Delta m$  分别为模型中的临界流速、尺寸、填充物相对水的密度; $g_m$  和  $g_p$  代表模型、原型的重力加速度。由于重力相似准则之中  $g_d = g_m$ ,推出  $\lambda_v = \{[\rho_{wn} \times l_p \times (\rho_{sp} - \rho_{wp})]/[\rho_{wp} \times l_m \times (\rho_{sm} - \rho_{wm})]\}^{1/2}$ 。其中: $\rho_{sn}$ 和  $\rho_{wn}$ 分别为原型中石子的密度和水流的密度; $\rho_{sm}$ 和  $\rho_{wm}$ 分别为模型中石子及水流的密度。密度比尺的确定视材料的具体情况而定  $\lambda_\rho = \rho_{sp}/\rho_{sm}$ ,质量比尺  $\lambda_m = \lambda_l^3 * \lambda_\rho^{[3]}$ 。最终确定的模型各类比尺大小如表 1 所示。

表 1 模型比尺选择  
Table 1 Selection of model scale

| 名 称                               | 比尺大小   |
|-----------------------------------|--------|
| 水平、竖直比尺( $\lambda_l, \lambda_h$ ) | 1:10   |
| 粒径比尺( $\lambda_D$ )               | 1:10   |
| 流速比尺( $\lambda_v$ )               | 1:3.14 |
| 输沙率比尺( $\lambda_G$ )              | 1:31.4 |
| 时间比尺( $\lambda_t$ )               | 1:3.18 |

试验水槽采用重庆交通大学水运实验室 1 m 宽水槽,其最大运行流量可达 300 L/s,满足基本的流速要求。整个水槽总长 26 m,宽、高各 1 m,上设悬车探针床沙冲深及网箱位移,下铺 20 cm 厚度床沙,中间水流及流速主要由旋桨流速计测取。由于原型网箱是用 PVC 外裹钢丝网制作,为满足相似性要求,实验模型采用 1 mm 粗细度的钢丝制作外网,其密度、孔隙率要求都与原型网箱一致,其中整体网箱密度为 1.5 t/m<sup>3</sup>,整体网箱孔隙率为 25%。模型制作满足重力相似准则,其尺寸设置与工程模型单体网箱结构满足比例一致。

实验证明,桥梁基体冲刷水毁最危险高度为刚淹没水深。虽然大多数时间,建设的网箱桥满

足基础高度大于水高度的要求,其水深不超过第一层网箱,但在 4—8 月雨季期间,水深可能达到二层甚至完全淹没状态,故而,在实验当中,为了模拟最危险状态,其流速设置为洪水流速 0.8 m/s,与此同时,水流高度设置为 20 cm,即刚刚淹没水深。此外,为了节省实验时间与成本,在网箱试验区域两侧铺设了砖块,在砖块内侧铺设床沙。其中床沙的长度为 3 m,压实度为 95%,中值粒径为 1.56 mm。实验物理模型放置于床沙之上,其中埋深为 10 cm,露出高度为 20 cm,距离前沿砖块的长度为 30 cm,距离后缘砖块的长度为 130 cm。实际布设图详见图 2,图中长度单位为 cm。

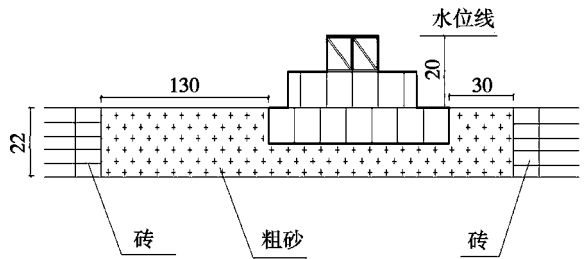


图 2 试验河床布置图  
Fig. 2 Test riverbed layout

本实验模型分为 2 组:双排基体和三排基体。实验中的沉降测点为沿水流方向和垂直于水流方向定位轴线的交点,其中于水平面垂直于水流方向布置 15 条横向定位轴线<sup>[4]</sup>,分别于桥前 1 cm、4 cm、9 cm、19 cm,桥身位置每 10 cm 布置一条,桥尾 2 cm、7 cm、17 cm,于水平面沿水流方向布置 9 条定位轴线,分别于桥中轴线,桥身左端 1 cm、4 cm、9 cm、19 cm,桥身右端 1 cm、4 cm、9 cm、19 cm。坐标设置(Y,X,Z)分别以沿水流方向、垂直于水流方向的水平面、垂直于水流方向的竖直面为准。对比探针测取的冲刷前后深度值得到测点深度。实验模型桥墩布点图如图 3~图 5,图中长度单位为 cm。测设点分布情况如下:墩前后 2 cm、7 cm、17 cm,墩左右 2 cm、7 cm、17 cm 各线交汇处。

以水位 20 cm 为临界状态。起始状态水位不足 20 cm 时,电机频率为 28 Hz,水流流速为 0.4 m/s;水位到达此高度后,立即调节尾门和电机频率,使流速达到 0.8 m/s。

2 模型试验及数据分析

2.1 石笼桥墩失稳机理分析

在实验和数值模拟的过程中发现网箱周围沙

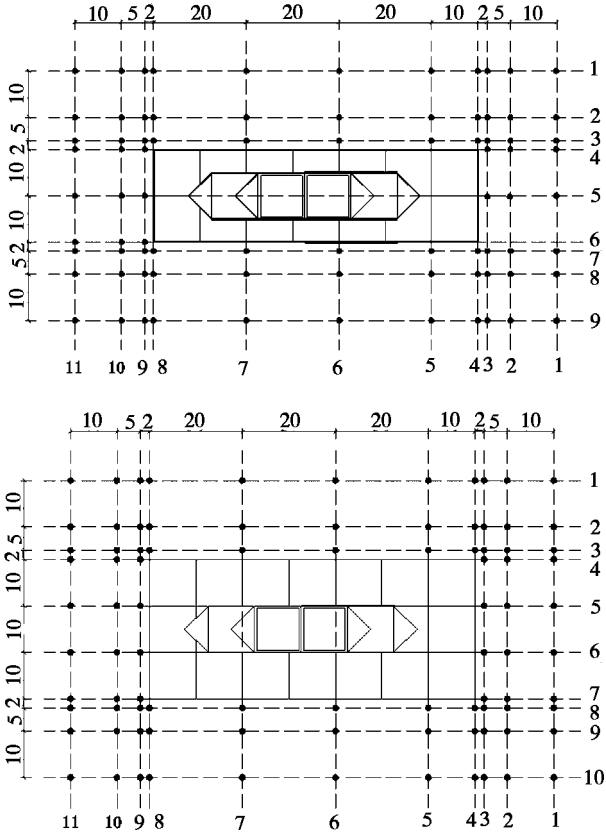


图 3 网箱基底河床测点布置图

Fig. 3 Layout map of the base river bed test point of the net cage

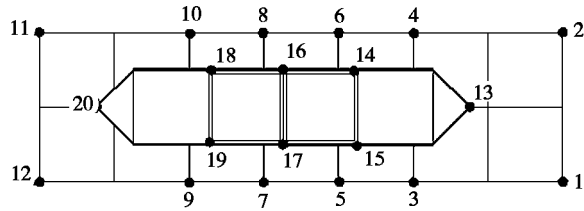


图 4 网箱测点布置(平面图)

Fig. 4 Layout of net cage test point (plane map)

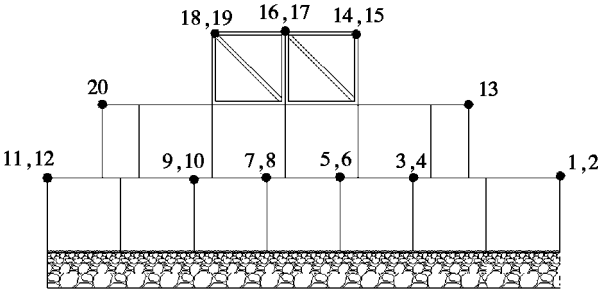


图 5 网箱测点布置(立面图)

Fig. 5 Layout of net cage test point (elevation map)

体从两角向中心发展,故分析假设掏空处在基体迎水面拐角处,形状为扇形,并以此形态不断向中心发展。网箱基体的受力分析图以及计算简图如图 6、图 7 所示。假设冲刷角点处的坐标是 $(x_0,$

$y_0)$ ,扇形的半径为 $R$ ,故而冲刷处外周公式:  
$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2 \quad (1)$$
  
式中: $x \geq 0, y \geq 0$  且满足  $x_0^2 + y_0^2 < R^2$   
常见的基体失稳模式为前倾或侧倾,其中前倾满足两侧扇形均不发展且基体受力均匀的情况;而在现实情况下,由于河沙的不均匀性和流体紊乱,侧倾占基体失稳的绝大多数。假设以冲刷体中轴线为基准,当冲刷面积相同时,基体失稳只可能以 $AB'$ 为轴线发生,其中 $B'$ 为 $OB$ 直线上的一点, $C$ 为基体俯视平面的中心点。

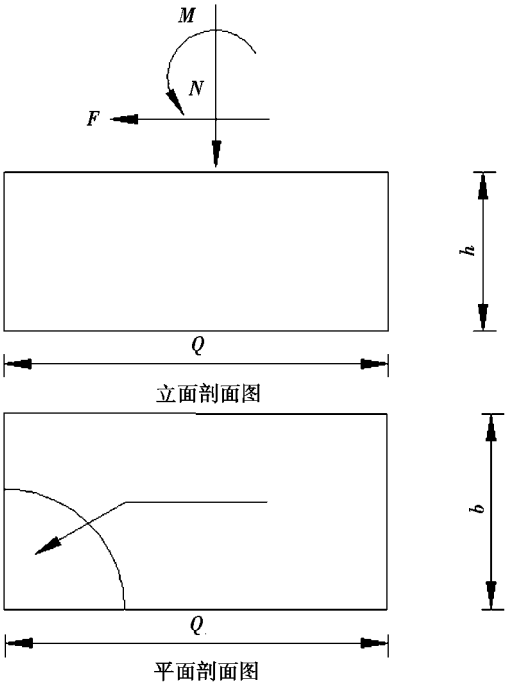


图 6 网箱基体受力分析

Fig. 6 Stress analysis of the net cage matrix

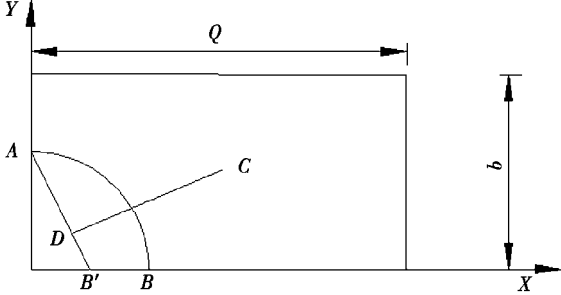


图 7 计算简图

Fig. 7 Calculation diagram

根据扇形方程, $A, B$  两点的坐标分别为 $(0, \sqrt{R^2 - x_0^2} + y_0)$ 、 $(\sqrt{R^2 - y_0^2} + x_0, 0)$ ,根据 $B$  位于直线 $OB$ 上,推出 $B'$ 的坐标为 $(\lambda \sqrt{R^2 - y_0^2} + x_0, 0)$ 。其中, $\lambda \in (0, 1)$ ,所以 $AB'$ 的方程为 $y = kx + \sqrt{R^2 - x_0^2} + y_0$ ,且方程中的 $k$ 满足:

$$k = -\frac{\sqrt{R^2 - x_0^2} + y_0}{\lambda \sqrt{R^2 - y_0^2} + x_0} \quad (2)$$

设点  $C$  到  $AB'$  的距离为  $S$ , 则

$$S = \sqrt{\frac{1}{k^2 + 1}} \left| \frac{a}{2}\lambda - \frac{b}{2} + \sqrt{R^2 - x_0^2} + y_0 \right| \quad (3)$$

水平方向上的力  $F$  和弯矩  $M$  在  $AB'$  垂直方向上的作用力分别为

$$F_{AB'} = -\frac{k}{\sqrt{1 + k^2}}F \quad (4)$$

$$M_{AB'} = -\frac{k}{\sqrt{1 + k^2}}M \quad (5)$$

故而,基体的倾覆力矩为:

$$M_q = -\frac{k}{\sqrt{1 + k^2}}Fh + \frac{k}{\sqrt{1 + k^2}}M \quad (6)$$

基础的稳定性抗倾覆力矩为:

$$M_w = (N + W)S \quad (7)$$

因此,基础抗倾覆稳定系数为

$$K_s = \frac{M_w}{M_q} \quad (8)$$

将公式(4)~(7)综合可得到:

$$K_s = \frac{N + W}{Fh + M} \times$$

$$\left[ \left[ \sqrt{R^2 - y_0^2} + x_0 - \frac{b(\sqrt{R^2 - y_0^2} + x_0)}{2(\sqrt{R^2 - x_0^2} + y_0)} \right] \lambda - \frac{a}{2} \right] \quad (9)$$

$$\text{令 } x_1 = \sqrt{R^2 - y_0^2} + x_0, y_1 = \sqrt{R^2 - x_0^2} + y_0$$

因  $A$ 、 $B$  两点的坐标分别为  $(0, y_1)$ 、 $(x_1, 0)$ , 故而公式(9)可以化为

$$K_s = \frac{N + W}{Fh + M} \times \left[ \left[ x_1 - \frac{bx_1}{2x_1} \right] \lambda - \frac{a}{2} \right] \quad (10)$$

其中对于任意的  $x_1$ 、 $y_1$  都有相应的  $x_0$ 、 $y_0$  与之对应,则

$$K_{s\min} = K_s|_{\lambda=0} = \frac{N + W}{Fh + M} \times \frac{a}{2} \quad (11)$$

抗倾覆系数较之前没有发生变化,故当  $y_1 \leq$

$\frac{b}{2}$  时,  $\frac{bx_1}{2y_1} - x_1 \geq 0$ , 因  $K_s$  是关于  $\lambda$  的增函数, 则

$$K_s = K_s|_{\lambda=1} = \frac{N + W}{Fh + M} \times \left( x_1 - \frac{bx_1}{2x_1} + \frac{a}{2} \right) \quad (12)$$

发现抗倾覆系数较之前相比变小。当  $A$  点超过基体前沿一半距离时,其抗倾覆系数减小,基底应力增大,应引起注意。

## 2.2 实验分析

在本次试验中,据现场试验记录,发现网箱桥墩沉降明显并伴有轻微倾斜。其中沿水流方向,

双排网箱整体后退 0.77 cm,较之三排网箱后退量 1.05 cm,小 26.7%;在侧倾方面,沿着  $X$  方向,双排网箱整体位移 5.6 cm,较之三排网箱 +0.88 cm,增幅 84.3%;而在主要变化量,即  $Z$  轴上,双排网箱沉降量为 3.5 cm,比三排网箱沉降量 1.17 cm,增大了 66.6%;网箱上各特征点,三排基础网箱中观测点 11、13 在  $X$  方向上分别移动了 -7.2 cm、-7.9 cm;值得注意的是,由于网箱基体下部基础的掏空效应,桥墩整体下沉,其中观测 2 点沉降明显,变化量为 7.2 cm,较之相同点,双排基础网箱的位移分别为 -11.8 cm, -12.2 cm, -12 cm,多出了 39.0%, 35.2%, 40.0%。

在冲刷时间上,三排网箱耐冲刷水毁时间为 170 min,双排网箱耐冲刷水毁时间为 58 min,三排基础较双排基础时间增加了 65.9%。

在整体床沙变化形态上,两种石笼桥墩结构周围沙体冲刷形态类似,总体而言,呈现沿水流方向上的抛物线结构和垂直水面结构的“W”形态,沿水流变化最大深度范围于轴线 3、5、7 处。对比双排基础网箱,双排基础网箱与三排基础网箱桥墩最大冲刷深度都出现在沿水流方向 5 号轴线与垂直水流方向 3 号轴线交点处即网箱桥墩前沿带,各轴线最大变化量不一,其中中轴线最大变化量为 22.2 cm,其余向外各轴线依次变化量为 21.1 cm、20.4 cm、19 cm、17 cm,三排网箱桥墩最大冲刷深度为 23.4 cm,沿中轴线以外各轴线分别产生了 22.4 cm、21 cm、20.2 cm、17.7 cm 的变化量,整体平均最大冲刷深度,三排基础网箱桥墩超出双排基础网箱桥墩 7.1%;而在最小变化量上,主要表现于各网箱尾端,其中双排桥墩变化量为 +6.8 cm,为中轴线处,其余沿中轴线向外分别为 10.6 cm、11.3 cm、12.2 cm、13.1 cm,三排网箱桥墩最小冲刷深度为 7.5 cm,沿中轴线以外的各轴线分别产生了 11.9 cm、13.0 cm、13.9 cm、14.8 cm 的变化量,在整体平均最小冲刷深度上,三排基础网箱桥墩超出双排基础网箱桥墩 13.0%。

从图 8 可以看出,双排基础网箱和三排基础网箱的桥墩均在沿着水流的  $X$  方向和垂直水流的  $Z$  方向发生了前倾和侧倾。故在主变量上,三排基础网箱冲刷位移较双排基础网箱具有显著的减小幅度,而在冲刷时间上提升明显(65.9%)。关于两种网箱形式各测点垂直方向的冲刷深度对比情况以及河床变化深度的最值对比情况如图 9、图 10 所示。

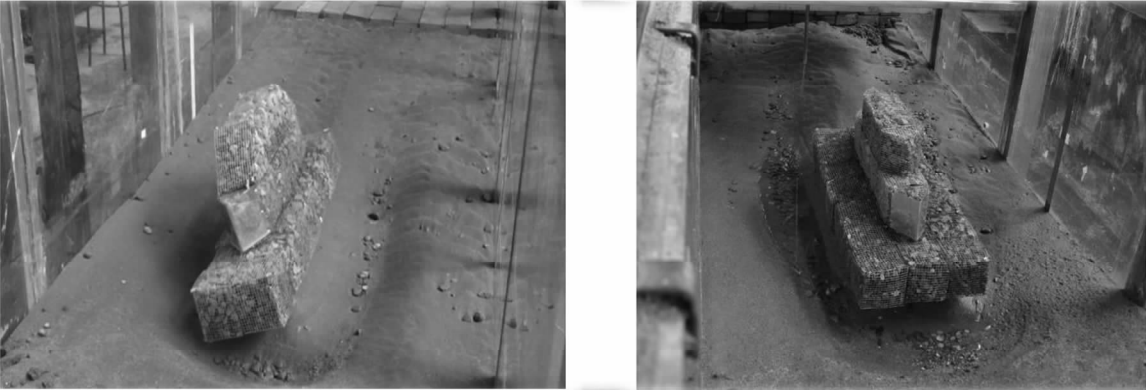


图 8 河床冲淤地形图  
Fig. 8 Riverbed erosion topographic map

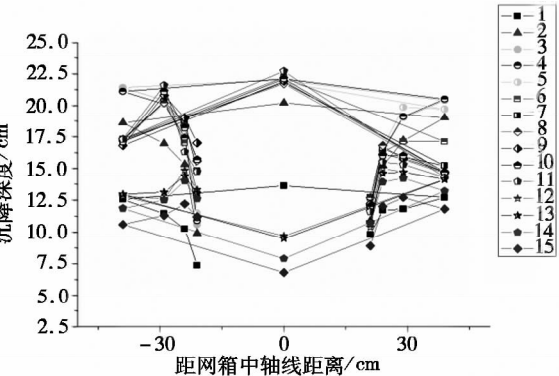


图 9 垂直水流方向 Z 轴冲刷深度变化图  
Fig. 9 Change of scour depth of Z axis in vertical flow direction

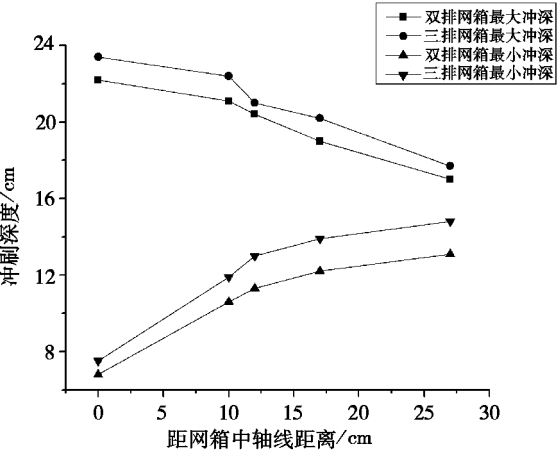


图 10 河床冲刷变化图  
Fig. 10 Change map of river bed scour

3 数值模拟分析

传统的实验手段在测量时往往会接触到物体,所以会对反映流场的物理量有一定的干扰,故采用那些实验手段无法达到本文精确观察流场的目的。所以本文特选用 Flow3D 软件,用其建立且计算的方钝体绕流模型不仅能从其他角度阐述此

类问题,还能更清晰的呈现流场特性,便于理解桥墩破坏过程以及原因。

3.1 控制方程

本次运用于模型计算里的流体为水,它跟很多物质一样,遵循着各种物理守恒规律,包括质量、能量、动量等守恒定律。但在此次模拟中,只考虑质量守恒定律和动量守恒定律,因为其在冲刷的过程未发生物质和能量的交换。

3.2 离散方法与算法

本文数值模拟利用有限差分法(FDM)计算分析。先将连续的计算域划差分为不同的有限数量的网格,然后直接用网格节点值参与计算,最后用差商导出微分方程(方程式),用离散点有限差分方程。目前,通过改进 Flow3D 原本的算法来得到的新算法不胜枚举,本文采用 VOF 法。

3.3 边界条件的选择

边界条件的如何选择对计算结果影响很大,所以在选取时,要充分考虑到流域内的物质和研究对象的特点<sup>[5]</sup>。所以在本次实验中,由于计算域内的流体为水,故将各边界条件设置如下:进水口为速度入口,出水口边界为流出口边界,模型底面与两侧面的边界条件均为壁面,其中入口速度为 0.8 m/s。

3.4 模型计算

对数值模拟研究范围的选取考虑如下:因为进行模型试验时的流场区域比较小,所以直接将模型试验河道流场区域作为数值模拟研究的范围,布置如图 11,其尺寸与模型试验一致。为了保障桥墩计算精度,在对石笼网箱桥墩作网格划分时,特进行了局部细分。以双排网箱为例,网格布置见图 12。

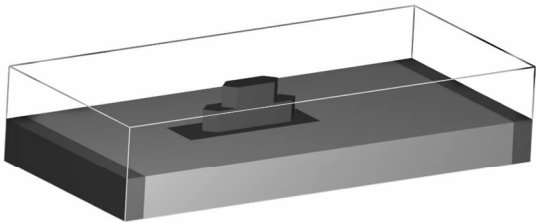


图 11 计算模型  
Fig. 11 Calculation Model

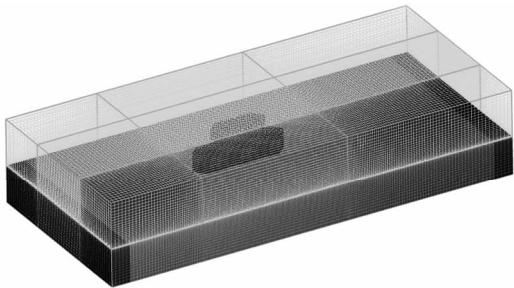


图 12 网格划分  
Fig. 12 Meshing

3.4.1 冲刷深度对比分析

数值分析分别模拟了双排网箱 58 min 和三排网箱 170 min 的冲刷形态。整体而言,数值模拟较好地还原了实验数据。在冲刷形态上,由于下切流而两侧绕流的影响,整体冲刷在俯视面上呈 V 字形,在冲刷深度上,在垂直水流方向,呈“W”字形,在沿水流方向,呈“√”字形,整体冲刷

形态符合。在冲刷深度上,双排网箱实际冲刷最大深度为 22.2 cm,模拟最大冲刷深度为 21.7 cm,相差 2.3%;双排网箱实际冲刷最大深度为 23.4 cm,模拟最大冲刷深度为 23.8 cm,相差 1.7%,与实验数据基本拟合。两种形式网箱的对比冲刷深度变化模拟图如图 13 所示。

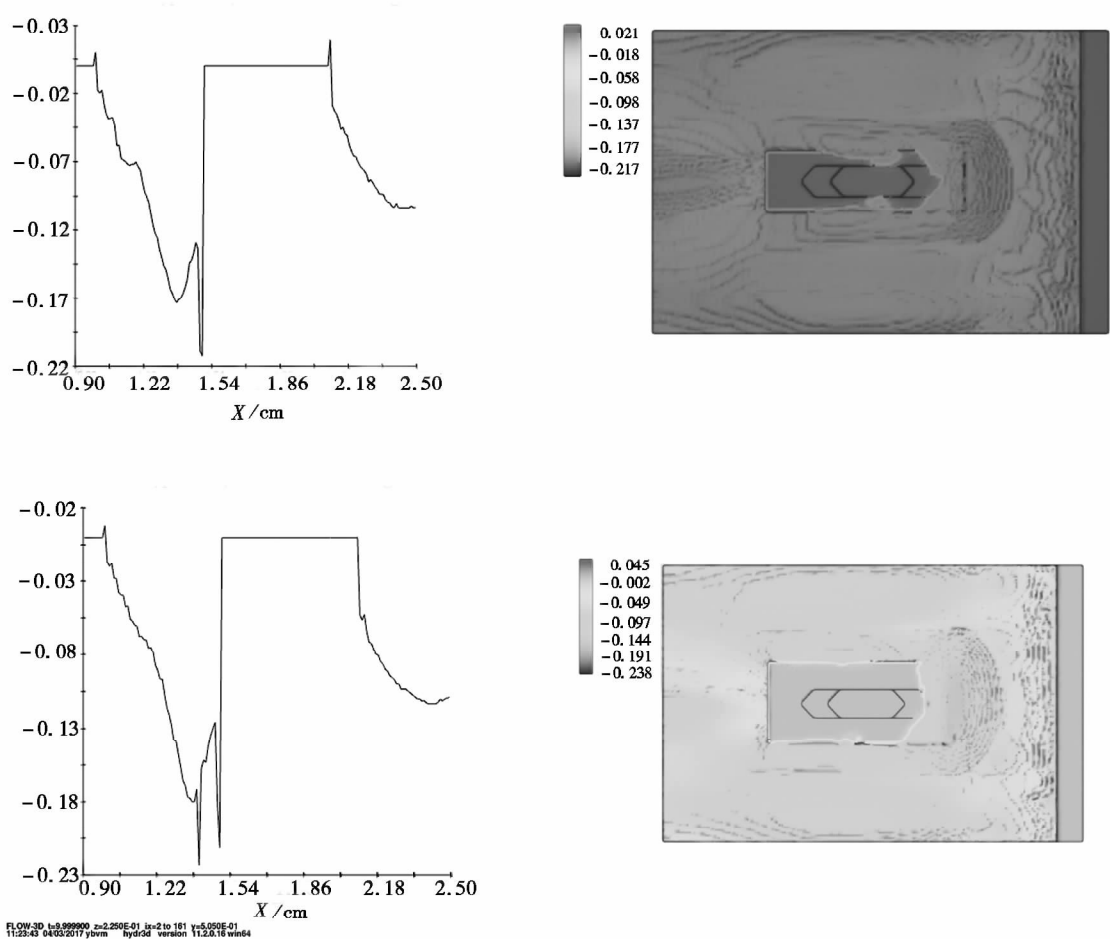


图 13 双排/三排网箱桥墩冲刷深度变化云图  
Fig. 13 Change cloud chart of double row / three row net box bridge pier scour depth

4 结语

本文应用模型试验与数值模拟的方法,分析了双排基础网箱与三排基础网箱桥墩在冲刷形态、冲刷深度、耐冲时间等的比较,得出以下结论:

(1)相较于双排网箱,三排网箱具有良好的耐冲性能,在增加一排网箱基体(50%)的条件下,其耐冲刷时间增加了 65.9%,至失稳时间,三

排基础网箱桥墩最大冲刷深度超出双排基础网箱桥墩 7.1%,最小冲刷深度超出双排网箱 13%。

(2)网箱的主要变化点集中于垂直水流方向的侧倾和沿 Z 轴方向的沉降,其沿水流 X 轴位移程度较小(1:3:8)。

由于条件的局限,数值模拟计算时将网箱化成了实体,并且部分结论对于其它形状的网箱不一定适用,更详细结果需进一步论证。

参考文献:

[1] 梁锴,方理刚,段靓靓. 冲刷对桥墩稳定性影响的有限元分析[J]. 岩土力学,2006,27(9):1643-1645.  
[2] 曲广琇,康家涛,王华,等. 受冲刷桥梁墩台基础地基承载力试验与墩台稳定性研究[J]. 公路工程,2008,33(4):61-66.  
[3] 陈志扬,吴钢锋,王振宇,等. 生态格网抗冲刷性能的试验研究[J]. 港工技术,2013(2):45-47.  
[4] 汪文萍,张昌银. 大型泵站大体积混凝土施工中的裂缝控制[J]. 湖南水利水电,2012(6):41-45.  
[5] 孟庆峰. 桥墩局部冲刷深度预测方法研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2008.

Impact Analysis of Base Width on Flood  
Damage of the Gabion Structure

WANG Shuo, WU Yuanyuan, QIU Yan

(1. Hehai College, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400041, China;  
2. Hydraulic Engineering Laboratory of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University,  
Chongqing 400041, China)

**Abstract:** The gabion is widely used in the construction of bridges in the mountain area but the flood damage happen frequently. In order to study the specific flood damage patterns of gabion structures, the scour shape and flow field of river sediment are analyzed by model experiment and numerical simulation. The results show that compared with double-row net cages, the three-row net cages have good impact resistance. During the destabilization time, the maximum scouring depth of the three-row foundation net cage pier exceeds 7.1% of the double-row foundation net cage pier, and the minimum scouring depth exceeds 13% of the double-row net cage. The main change in net cages is the generation of a range of settlements. These settlements are centered on the roll in the direction of the vertical flow and along the Z-axis, with very little displacement in the direction of the water flow (X-axis).

**Keywords:** Gabion pier; scour depth; model test; numerical simulation

(责任编辑:张英健)