



## 单个透水框架的三维数值模拟研究

蒋波, 雷国平, 尹书冉, 谷祖鹏

(长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430011)

**摘要:** 透水框架因其具有较好的防冲促淤功能, 在航道整治中得到了广泛的应用。主要对单个四面六边体透水框架和双工字型透水框架进行三维水流数值模拟, 揭示其防冲促淤机理, 并对两者之间的差别进行对比分析。结果表明: 透水框架通过改变水流的大小和方向及加速水流能量的消耗来促进泥沙的淤积, 相对于四面六边体透水框架, 双工字型透水框架具有更好的防冲促淤能力。

**关键词:** Fluidity; 大涡模拟; 单个透水框架; 新型

**中图分类号:** TV 143

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2014)12-0168-05

### 3D flow simulation of single permeable frame

JIANG Bo, LEI Guo-ping, YIN Shu-ran, GU Zu-peng

(Changjiang Waterway Planning, Design and Research Institute, Wuhan 430011, China)

**Abstract:** Flows through a tetrahedron frame and a double H permeable frame in a smooth channel are simulated using an open source CFD soft Fluidity. Results of the numerical simulation are that the permeable frame may reduce the eddy viscosity which is helpful to the flow turbulent motion and the energy dissipation, induce sediment deposition in a sediment laden flow by changing the flow direction and increase the energy dissipation. The double H permeable frame can retard local flow velocities and enhance sediment deposition and new land creation better.

**Keywords:** Fluidity; LES; permeable frame; new type

因为护岸工程极其重要, 广大水利及航道工作者长期以来对护岸工程不断探索、研究和实践, 形成了一批新工艺、新方法, 并在实际工程中得到了一定程度的推广运用。西北水科所于20世纪80年代提出应用四面体透水框架投放在江河中筑成透水坝, 从而有效地保滩护岸<sup>[1]</sup>, 并于1995年开展模拟试验, 将该技术应用到江西省九江大堤, 并取得了较大的社会效益<sup>[2]</sup>。西北水科所通过众多的室内试验和现场测验得出如下结论: 四面六边体透水框架具有十分明显的减速落淤作用; 重心较低, 具有良好的稳定平衡。王南海等<sup>[3]</sup>通过室内试验和现场工程试验, 证实四面六边体透

水框架群具有较好的消能、减速、缓冲、落淤作用, 成功地应用于九江市长江东岸堤试验工程和长江彭泽县金鸡岭段固岸试验工程, 并取得了较好的效果。2000年6月长江干堤西梁公堤“狗头矶”防护、2001年新疆盖孜河马场大弯道河道整治等工程中<sup>[4]</sup>, 四面六边透水框架均发挥了巨大的作用, 起到了很好的护岸护滩作用。

随着四面六边体透水框架在实际工程中的推广运用, 对四面六边体透水框架的研究也逐渐增加, 在护岸机理、水流特性、阻力特性和设计参数等方面的研究取得了一定的成果。

林云光<sup>[5]</sup>通过水槽试验分析, 得出框架床面

**收稿日期:** 2014-10-08

**作者简介:** 蒋波 (1987—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事河流动力学数值模拟和航道演变与整治。

糙率值与影响因素的关系: 透水框架护底床面糙率值与框架群条件和水流条件有关, 糙率值随水深、流速增大而减小, 并趋于稳定值, 当水深、流速足够大时, 糙率值只与框架群条件有关。李若华<sup>[6]</sup>通过理论分析、物模试验、数值模拟等研究手段对空心四面体框架群的减速特性进行了较为深入的研究, 建立了阻力系数与框架群等效曼宁糙率系数的转换关系, 拟合出了糙率的经验计算公式。徐锡荣等<sup>[7]</sup>结合长江南京河段的水沙条件, 采用试验模拟方法对透水框架四面体阻力特性和护岸抗冲特性进行研究, 四面六边体透水框架的阻力随水深的增加而减少且趋于一定值。

周根娣等<sup>[8]</sup>通过实体与框架结构的比较, 得知框架群减速相对温和、无回流、紊动性小, 不易形成局部冲刷坑。Lu 等<sup>[9]</sup>研究了流经四面体透水框架的水流紊动特性, 试验采用二维光纤激光多普勒测速计进行测量, 得出在框架群阻滞区平均纵向流速减小、而纵向和垂向紊动强度增大的结论; 认为框架群通过减小流速和减小剪切应力来减小挟沙能力、通过改变水流方向和提高能量消耗的方式来引起水流的泥沙沉降。刘倩颖等<sup>[10]</sup>通过水槽概化模型试验, 对比分析有无护滩建筑物时四面六边透水框架附近的水流结构, 给出了四面六边体透水框架周围纵向和横向水面线的趋势以及周围流速的变化, 认为护滩后水流比较平顺, 能够起到减速促淤的作用, 对滩体的守护作用明显。高柱等<sup>[11-12]</sup>在 CFD 通用程序 Fluent 平台上建立三维水动力数值模型, 对单一贴壁四面体透水框架的清水流场进行模拟, 研究表明该数值模型有效地补充了三维复杂流场的物理试验结果, 有助于理解四面体框架的防护机理。

综上所述, 对透水框架的研究主要集中在对四面六边体透水框架的研究方面, 主要包括: 四面六边体透水框架阻水率、减速率的研究, 单个四面六边体透水框架阻力系数的研究, 四面六边体透水框架的抛投参数及平面布置, 四面六边体透水框架在实际工程中的应用等方面。研究手段主要集中在室内试验和现场测试, 对四面六边体

透水框架群尤其是新型透水框架的三维数值模拟研究不足。本文主要对单个四面六边体透水框架和双工字型透水框架进行三维数值模拟, 简要探讨单个透水框架的水动力学特性, 为以后透水框架群的三维数值模拟和水动力学特性研究提供一定的基础。

## 1 数学模型的建立

本文采用英国帝国理工开发的一款 CFD 开源多相流计算软件<sup>[13]</sup> Fluidity 对透水框架进行模拟计算, 该软件使用有限元或控制体积方法求解 Navier-Stokes 方程, 采用非结构有限单元网格, 可模拟计算一维、二维、三维的流体力学问题。

### 1.1 模型介绍

流体控制方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla \cdot \overline{\boldsymbol{\sigma}} + \rho \mathbf{F} \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为流体密度;  $\rho \mathbf{u}$  为流体的质量通量;  $\overline{\boldsymbol{\sigma}}$  为流体微团的应力张量;  $\mathbf{F}$  为单位质量力 (如重力)。

为了使方程封闭, 需要引入紊流模型计算应力张量。本文采用的方法为大涡模拟, 该方法是对紊流脉动 (或紊流涡) 的一种空间平均, 也就是通过某种滤波函数将大尺度的涡和小尺度的涡分离开, 大尺度的涡直接模拟, 小尺度的涡用亚网格模型来封闭。

### 1.2 网格划分及计算条件

本文使用用于三维有限元网格划分的开源软件 Gmsh 对模型进行网格划分<sup>[14]</sup>。图 1 分别为四面六边体透水框架和双工字型透水框架的模拟计算区域。计算范围长 10.80 m、宽 5.0 m、高 1.8 m。四面六边体透水框架杆件长 0.8 m、宽 0.1 m, 双工字型透水框架的杆件长 0.8 m、宽 0.1 m。编号 114 和 34 断面为进口边界, 编号 116 和 36 断面为出口边界。本文计算工况为: 0.05、0.1、0.5、1.0、1.5 m/s。除流速不同外, 各工况其余参数一致。

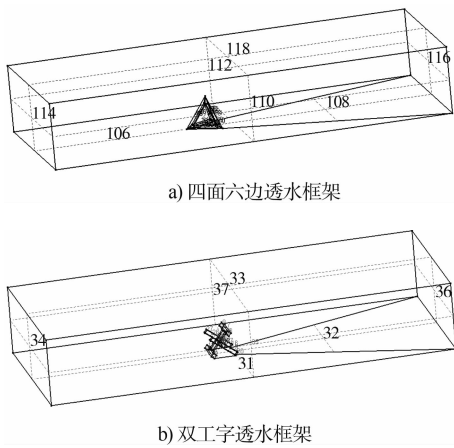


图 1 计算区域

## 2 结果及分析

### 2.1 阻力特性

根据水流能量守恒，从式(3)求出单个透水框架的局部水头损失  $h_f$  (周界无阻力)，见表 1。

$$Z_{in} + \frac{P_{in}}{\rho g} + \frac{v_{in}^2}{2g} = Z_{out} + \frac{P_{out}}{\rho g} + \frac{v_{out}^2}{2g} + h_f \quad (3)$$

从表 1 可知，流速越大，局部水头损失越大，耗能越大，且四面六边体透水框架的局部水头损失较双工字型透水框架大。这是因为四面六边体透水框架的杆件长 1 m，框架高 0.86 m，而双工字型透水框架为 0.8 m，框架高 0.38 m，使四面六边体透水框架的相对糙度大于双工字型透水框架。

表 1 透水框架局部水头损失

流速/(m·s <sup>-1</sup> )	水头损失/10 <sup>-7</sup> m	
	四面六边体	双工字型
0.05	0.085	0.059
0.10	0.278	0.176
0.50	2.043	1.532
1.00	5.128	3.017
1.50	5.695	4.243

图 2 为单个透水框架的局部水头损失系数  $\epsilon$ ，该系数由  $h_f = \epsilon v^2 / (2g)$  求解。表明单个透水框架局部阻力系数随着流速的增加逐渐减小，且逐渐趋于一恒定值。结果与林云光<sup>[11]</sup>通过水槽试验分析得出的框架群的阻力变化类似，即糙率值随流速增大而减小，并趋于恒定值；双工字型透水框架的局部阻力系数均小于四面六边体透水框架，

流速越大差值越小，即流速越大两者的阻力系数越接近。

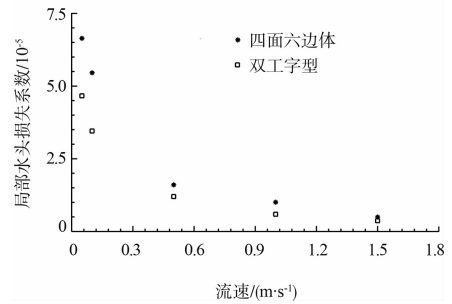


图 2 单个透水框架的局部水头损失系数

### 2.2 流速分布

图 3 和 4 分别为四面六边体透水框架和双工字型透水框架高程为 25 cm 的流速流线水平切面图。可以看出，水流向框架两侧挤压，同时水流上雍；框架左右两侧流速增加，框架内部及后缘流速较小，且越靠近底部流速越小；四面六边体透水框架的流速减缓区主要集中在框架内部，而双工字型透水框架则主要集中在框架后缘一定区域。

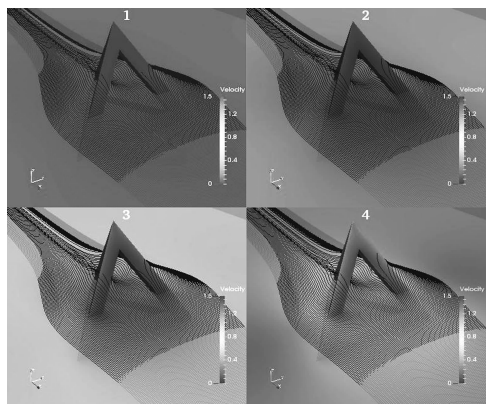


图 3 四面六边体透水框架流速流线 (水平切面 Z = 25 cm)

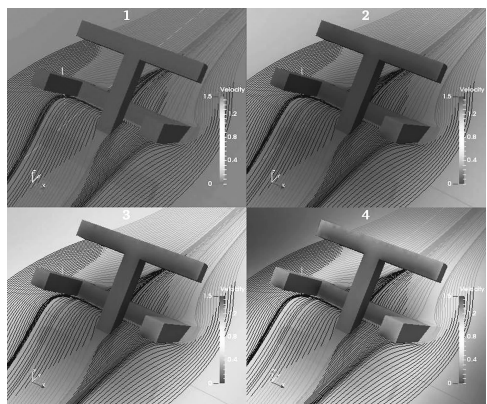


图 4 双工字型透水框架流速流线 (水平切面 Z = 25 cm)

图 5 和 6 分别为四面六边体透水框架和双工字型透水框架的流速横切面。表明双工字型透水框架对框架后流速降低的作用和范围较四面六边体透水框架明显。

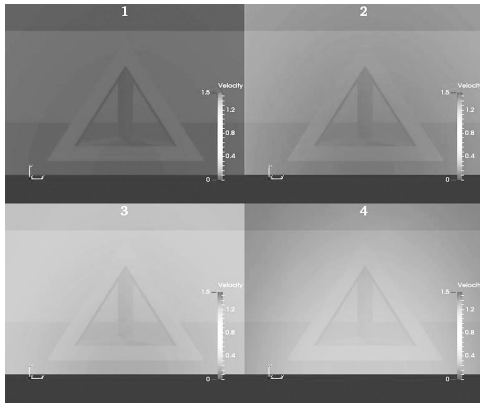


图 5 四面六边体透水框架流速 (横切面  $X = 45 \text{ cm}$ )

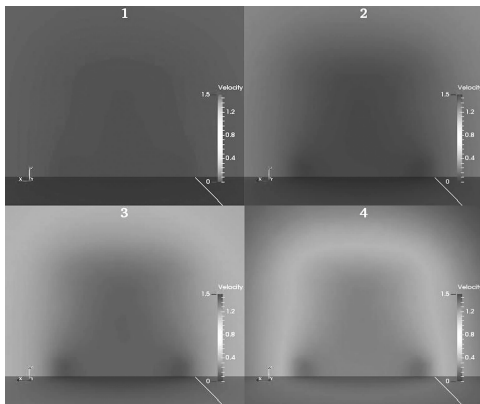


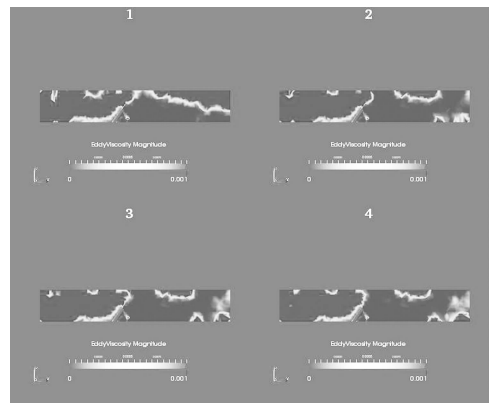
图 6 双工字型透水框架流速 (横切面  $Y = 45 \text{ cm}$ )

### 2.3 紊动分析

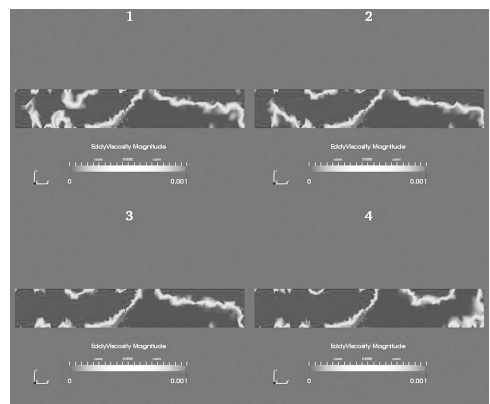
本文选取部分紊动涡黏系数 (本文的涡黏系数均指亚网格动态涡黏系数) 切面图。图 7 分别为四面六边体透水框架和双工字型透水框架涡黏系数的纵切面图。纵切面图表明, 单个透水框架能减少其后缘部分区域的涡黏系数, 有利于水体的涡动及能耗。

图 8 分别为四面六边体透水框架和双工字型透水框架底部涡黏系数的水平切面图 ( $Z = 15 \text{ cm}$ )。表明流速越小对透水框架后缘底部水流的涡黏系数影响越大, 即在透水框架顶部高程以下, 流速越大, 涡黏系数减小范围越小; 除流速为  $0.1 \text{ m/s}$  工况, 四面六边体透水框架对底部的影响长度大致为  $3.5 \sim 4.5 \text{ m}$ , 宽度大致为  $4 \text{ m}$  左

右; 双工字型透水框架对底部涡黏系数的影响宽度大致为  $4 \text{ m}$  左右, 其影响长度除流速为  $1.5 \text{ m/s}$  工况的大致为  $3.5 \sim 4.5 \text{ m}$  外, 其余工况的影响长度大约为  $6 \text{ m}$ 。可以得出在同一流速条件下, 双工字型透水框架对其下游底部的涡黏系数减小范围较四面六边体的减小范围大, 即双工字型透水框架的下游底部水流容易涡动的范围较四面六边体的大。

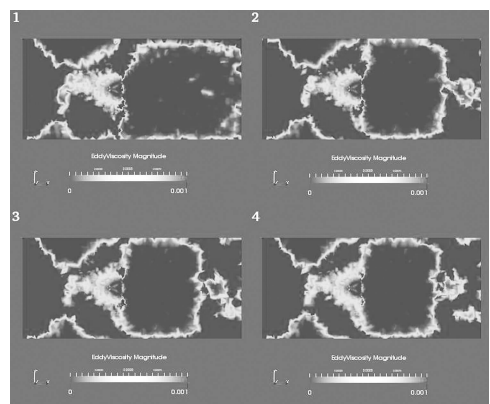


a) 四面六边透水框架

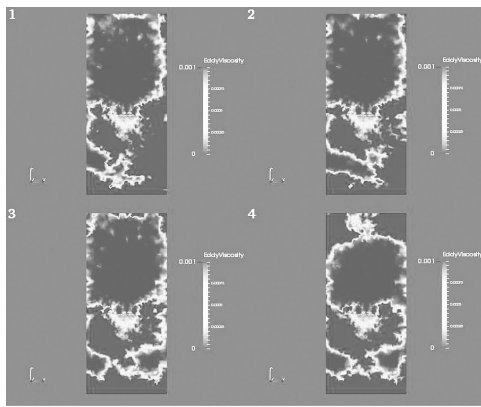


b) 双工字透水框架

图 7 透水框架四周流体涡黏系数 (纵切面)



a) 四面六边透水框架



b) 双工字透水框架

图8 透水框架四周流体涡黏系数 (水平切面 Z = 15 cm)

### 3 结论

1) 单个透水框架的局部水头损失随着流速增加而增加, 阻力系数都随着流速的增加而减小, 并趋于一定定值。

2) 透水框架通过向两侧及顶部挤压水流, 在其附近形成流速减缓区, 而框架两侧及顶部流速相应增加, 单个四面六边体透水框架的流速减缓区主要集中在框架内部, 单个双工字型透水框架则主要集中在框架后缘一定区域。

3) 透水框架能有效减小框架后缘部分区域的涡黏系数, 有利于水体的紊动及能耗, 通过改变水流状态(方向、大小)和加速水流能量的消耗来促进泥沙的淤积, 双工字型透水框架对其后缘水流的能耗明显大于四面六边体, 具有更好的防冲促淤能力。

### 参考文献:

[1] 徐国宾, 张耀哲, 徐秋宁, 等. 多沙河流河道整治新型工程措施试验研究[J]. 西北水资源与水工程, 1994(3): 1-8.  
 [2] 张文捷, 王玢, 麻夏, 等. 江河护岸新技术——四面六边透水框架群[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.

[3] 王南海, 张文捷, 王玢. 新型护岸技术——四面六边透水框架群在长江护岸工程中的应用[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(2): 11-16.  
 [4] 张卫云, 倪苏俊, 曹民雄, 等. 四面六边透水框架水动力特性及应用效果研究进展[C]//左其华, 窦希萍. 第十六届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 中国海洋出版社, 2013.  
 [5] 林云光. 新型河道整治结构——混凝土妈搓的阻力特性研究[J]. 水运工程, 2003(7): 1-14.  
 [6] 李若华. 空心四面体框架群减速特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.  
 [7] 徐锡荣, 刘刚, 徐松年, 等. 透水框架四面体防洪护岸试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(5): 65-69.  
 [8] 周根娣, 顾正华, 高柱. 四面六边透水框架尾流场特性[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(3): 9-12.  
 [9] Lu J Y, Chang T F, Chiew Y M, et al. Turbulence characteristics of flows passing through a tetrahedron frame in a smooth open-channel [J]. Advances in Water Resources, 2011, 34(6): 718-730.  
 [10] 刘倩颖, 王平义, 喻涛, 等. 四面六边透水框架群的护滩效果研究[J]. 水运工程, 2009 (12): 44-48.  
 [11] 高柱, 殷杰, 唐洪武, 等. 单一贴壁四面体框架绕流场三维数值模拟[J]. 水科学进展, 2010, 21(2): 161-166.  
 [12] Gao Z, Li X, Tang H W, et al. Three-dimensional hydrodynamic model of concrete tetrahedral frame revetments [J]. Journal of Marine Science and Application, 2009 (4): 338-342.  
 [13] Applied Modelling and Computation Group (AMCG). Fluidity Manual [EB/OL]. London: Imperial College London, 2014. [2014-08-01] [http://figshare.com/articles/Fluidity\\_manual\\_v4\\_1\\_10/1089457](http://figshare.com/articles/Fluidity_manual_v4_1_10/1089457).  
 [14] Christophe Geuzaine and Jean-François Remacle. Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre-and post-processing facilities [EB/OL]. [2014-08-01]. <http://geuz.org/gmsh/#Documentation>.

(本文编辑 武亚庆)