

DOI:10.12170/20190216001

刘建华, 杨中华, 李达, 等. 考虑底部过流的透水框架群阻力系数研究 [J]. 水利水运工程学报, 2020(2): 73-78. (LIU Jianhua, YANG Zhonghua, LI Da, et al. Resistance coefficient equation for permeable tetrahedron frames[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(2): 73-78. (in Chinese))

# 考虑底部过流的透水框架群阻力系数研究

刘建华<sup>1</sup>, 杨中华<sup>1</sup>, 李达<sup>1</sup>, 李明<sup>2</sup>

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430040)

**摘要:** 研究底部过流条件下透水框架群的阻力系数具有现实意义。将透水框架视为大尺度粗糙结构体, 利用入侵深度, 建立了大尺度粗糙结构体过流的水动力双层模型, 将水流沿垂向分为上部自由流动层和底部透水层, 得出考虑底部过水和占用过水面积的大尺度粗糙河床阻力系数计算式。透水框架水槽试验的数据表明, 框架群铺设后纵向流速随水深变化的垂向分布呈“S”型。利用 47 组雷诺数为 25 000~50 000 的试验数据率定出推导公式的形状系数, 最终得出透水框架群阻力系数计算式。

**关键词:** 透水框架; 大尺度粗糙; 双层模型; 阻力系数

中图分类号: TV131

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2020)02-0073-06

四面体透水框架是近年来得到广泛应用的一种“亲水性”生态护堤固岸、防护墩柱技术, 其结构基本形式为 6 根相同的钢筋混凝土支架拼接而成的正四面体, 内部空心可透水。四面体透水框架施工简单、成本较低, 特殊的结构使得其减速促淤效果明显、适应河床变形能力强, 优良的透水性减小了对水生动植物与陆地生态循环的影响, 是一种多功能生态技术<sup>[1-2]</sup>。目前透水框架的研究偏向于防冲促淤、减速效果等的定性分析研究。徐国宾等通过室内试验分析透水框架群减速落淤和防护效果, 并探讨其布置的密疏度、框杆断面形式和长宽比以及框架群空间布设尺度对减速率的影响<sup>[3]</sup>; 杨中华等利用 PIV 研究四面六边透水框架周边流场性质, 结果表明背流布置与迎流布置相比减速效果更好<sup>[4]</sup>; Wang 等从流速分布、水深和阻力系数等方面探究清水过流条件下透水框架对河道保护作用<sup>[5]</sup>。

框架群的铺设加大了河道阻力, 在河道水力计算中需要考虑其阻水作用。目前对于透水框架阻力大小的理论研究存在不足。已有研究大多针对其水力特性展开, 涉及阻力系数计算方面研究少。李若华通过水槽试验数据拟合建立计算式, 但无严密的理论分析<sup>[6]</sup>。阻力系数法是量化河床床面阻力大小的最常见方法, 当床面粗糙度较小时, 可以将其对水流的影响等效视为河床阻力, 得到床面阻力系数与粗糙高度的关系<sup>[7]</sup>; 但当河床床面的粗糙度很大, 影响到水流过水面积的情况下, 传统的阻力系数与粗糙高度的关系式不再满足。已有研究忽略大尺度的粗糙结构体底部过流量, 得出不考虑底部透水情况下的阻力系数与粗糙高度的关系式<sup>[8-10]</sup>。而在实际河道中, 对于透水框架这类大尺度粗糙结构体, 形态结构往往使其内部具备一定透水能力, 这种情况下透水框架的阻力系数计算式有待进一步研究<sup>[11]</sup>。

对于有底部透水层的流动问题, 当前研究主要是将流动进行分区, 提出了多种流速分层理论<sup>[12-13]</sup>。利用分层理论求解断面的平均流速需要对每一层流速分布分别求解, 所用方法较为复杂, 难以直接应用到河道

收稿日期: 2019-02-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51879199, 51679170, 51439007)

作者简介: 刘建华(1995—), 男, 安徽合肥人, 博士研究生, 主要从事环境与生态水力学研究。

E-mail: jhliu1995@whu.edu.cn 通信作者: 杨中华(E-mail: yzh@whu.edu.cn)

过流能力的计算中。同时,粗糙体排列方式、底层透水量的计入也增加了问题的难度。因此,本文将从建立考虑底部过流的透水框架河床粗糙系数的角度出发,将透水框架视为大尺度的粗糙结构体,考虑大尺度粗糙体内部过流流量,基于已有的流速分层理论,结合透水框架的结构性质,提出透水框架阻力系数与相对粗糙特征高度之间关系的计算式。

## 1 大尺度粗糙结构体特征高度理论

利用边界层理论和混合层理论研究底部透水条件下的水流特性,主要特征高度包括当量粗糙度  $k_s$ 、零平面位移  $y_0$  和入侵深度  $\delta_e$  等特征高度。当量粗糙度  $k_s$  用来概化床面粗糙高度,一般认为其大小与河床颗粒粒径及级配有关<sup>[14]</sup>。零平面位移  $y_0$  用来描述理论河床下降后的高度位置,表征粗糙体吸收动量的平均位移,常用粗糙体与水流接触面流速廓线由高向低延伸至流速为 0 处高度表示<sup>[15-17]</sup>。不考虑底部过水时,在相对淹没深度较小条件下, Bayazit<sup>[8]</sup> 利用对数分布律求出  $y_0$  与  $k_s$  关系。粗糙结构体在  $k_s$  高度处与自由水面接触,此处紊动切应力最大,在零平面位移高度处切应力达到最小,与混合层理论中入侵深度  $\delta_e$  物理意义类似<sup>[18]</sup>。

考虑底部过水情况下,常用入侵深度  $\delta_e$  表示垂向流速分布规律的分界,渗透深度下界面上下层流速分布规律不同,对于不规则排列的粗糙结构体没有对应的求解公式。当结构体排列紧密时,粗糙体与水流接触面处流速较低,流速廓线延伸长度短,理论河床下降高度相对于  $k_s$  较低;而切应力减小的速率快,入侵深度  $\delta_e$  同样相对于  $k_s$  较小。当结构体排列稀疏,两者相对于  $k_s$  较大。因此本研究将零平面位移  $y_0$  与入侵深度  $\delta_e$  下界面处高度值视为相等。这种情况下,以入侵深度下界线  $y=0$  为分界线将水流在垂向上分为两层(图 1):上层为上部自由流动层,其高度  $h$  为自由流动液体高度与入侵深度  $\delta_e$  之和;下层为底部透水框架透水层,上层自由流动液体对其影响很小,主要受水的重力与透水框架结构体的拖曳力影响,黏性底层的黏滞阻力作用可忽略不计。

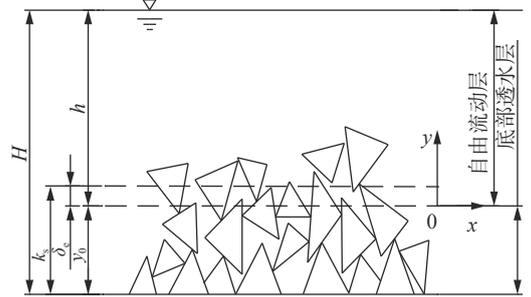


图 1 双层模型示意

Fig. 1 Two-layer model diagram

图 1):上层为上部自由流动层,其高度  $h$  为自由流动液体高度与入侵深度  $\delta_e$  之和;下层为底部透水框架透水层,上层自由流动液体对其影响很小,主要受水的重力与透水框架结构体的拖曳力影响,黏性底层的黏滞阻力作用可忽略不计。

## 2 考虑粗糙结构体底层透水的阻力系数公式推导

根据分层理论,对上部自由流动层和底部透水层分别计算。

在底部透水层中,水体流动受到水重力的分力、切应力和粗糙结构体产生的拖曳力的影响。入侵深度以下的水体,切应力可以简单视为 0,线性动量守恒,此时为重力分力与拖曳力之间的平衡。因此,对于均匀流条件下的底部透水层,根据动量方程得:

$$gi\phi = aC_D U_{\text{sub}}^2 / 2 \quad (1)$$

式中:  $g$  为重力加速度;  $i$  为能量坡降;  $\phi$  为孔隙率,  $a$  为粗糙体单位体积的迎流面面积;  $C_D$  为拖曳力系数,与结构体形状、来流的雷诺数  $Re$  等有关;  $U_{\text{sub}}$  为底部透水层平均流速。由式(1)可得:

$$U_{\text{sub}} = \sqrt{2gi\phi / (aC_D)} \quad (2)$$

研究过流断面阻力系数  $f$  时,常利用达西-维茨巴赫公式:

$$f = 8gRi/U^2 \quad (3)$$

式中:  $R$  为水力半径;  $U$  为断面深度平均流速。将自由液面与渗透深度的流动视为整体, 即  $R = h$ , 代入式(3)计算上部自由流动层阻力系数:

$$f_{\text{sur}} = 8ghi/U_{\text{sur}}^2 \quad (4)$$

式中:  $U_{\text{sur}}$  为该层平均流速。Yen<sup>[7]</sup> 结合 Manning 公式推导出适用于计算小尺度粗糙结构体阻力系数:

$$f_{\text{sur}} = N(k_s/h)^{1/3} \quad (5)$$

式中:  $N$  为形状系数, 与粗糙体结构种类有关。Cheng<sup>[9]</sup> 在不考虑底部透水情况下利用边界层理论研究大尺度粗糙体阻力系数时, 证实当零面位移高度取值合适, 上层的有效阻力系数可用式(5)求出。Li<sup>[12]</sup> 利用混合层理论分析一定植被密度条件下的刚性植被过水的试验数据, 得出上层自由流动层阻力系数计算满足式(5)。本文也将式(5)作为上层流动的阻力系数计算式。将式(5)与(4)联立, 得:

$$U_{\text{sur}} = (8gi/N)^{1/2} h^{2/3} k_s^{-1/6} \quad (6)$$

根据连续性方程, 得:

$$U_{\text{sur}}h + \phi U_{\text{sub}}y_0 = U_{\text{tot}}H \quad (7)$$

将式(2)与(6)代入式(7)得:

$$U_{\text{tot}} = \frac{1}{H} \left[ \left( \frac{8gi}{N} \right)^{1/2} h^{5/3} k_s^{-1/6} + \sqrt{\frac{2gi}{aC_D}} \phi^{3/2} y_0 \right] \quad (8)$$

不规则排列的大尺度粗糙结构体水力半径  $R$  为:

$$R = \frac{A}{\chi} = \frac{Bh + By_0\phi}{B + 2H} \quad (9)$$

将式(8)和(9)代入式(3), 得过流断面阻力系数  $f_{\text{tot}}$  为:

$$f_{\text{tot}} = \frac{8g(h+y_0)^2 Ri}{\left[ \left( \frac{8gi}{N} \right)^{1/2} h^{5/3} k_s^{-1/6} + \sqrt{\frac{2gi}{aC_D}} \phi^{3/2} y_0 \right]^2} \quad (10)$$

对于透水框架, 应用推导公式(10)需要确定当量粗糙度  $k_s$ 、零平面位移  $y_0$ 、孔隙率  $\phi$ 、透水框架单位体积迎流面面积  $a$ 、拖曳力系数  $C_D$  和形状系数  $N$  值。

### 3 四面体透水框架过流条件下参数确定和公式验证

#### 3.1 试验概况

试验在 Armfield 公司生产的高精度变坡水槽中进行, 试验装置如图 2, 水槽长 7.50 m, 宽 0.30 m, 高 0.45 m。流量范围为 0~30 L/s, 坡度为 0~2%, 用于测量精度要求较高的明渠流动试验。水深及框架平均高度由探针测量, 精度为 0.1 mm。

试验中的透水框架有 4 种型号(表 1), 模型几何比尺为 20。模型满足几何相似和水流运动相似(含流态相似)。共有 6 种铺设类型, 铺设长度均为 7 m。其中 3 种铺设选取单一类型(型号 4)框架铺设, 另外 3 种使用混合类型(包含所有型号)的框架铺设, 单一类型框架两种铺设与混合类型框架 2 种铺设的框架体

体积相同。调整坡度分别为 0.001 与 0.002, 同时设置流量为 6~13 L/s。实际设定工况共计 47 组。利用探针测量水深与框架体平均高度。PIV 用于测量均匀流条件下框架上层断面流速, 进而计算底部透水量。

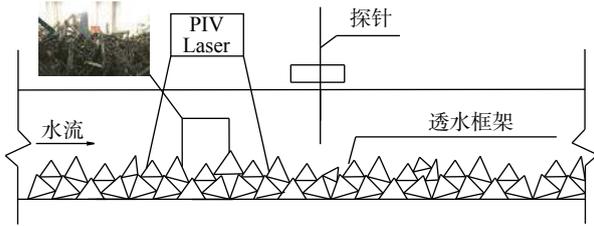


图 2 试验装置示意

Fig. 2 Experimental set-up

表 1 框架尺寸

Tab. 1 Frame size

框架型号	截面形状	直径(边长)/cm	单个体积/cm <sup>3</sup>
型号1	圆形	1.5	0.27
型号2	圆形	2.0	0.57
型号3	圆形	3.0	0.76
型号4	方形	5.0	7.46

### 3.2 数据分析

**3.2.1 流速分布** 框架铺设前, 水深方向上断面流速分布呈“J”型, 黏滞力使得流速在水层上部减小速率缓慢, 随着水深减小, 流速减小速率逐渐增大; 框架群铺设后, 水深方向上断面流速分布呈“S”型, 黏滞力使得框架群上部水层流速减小缓慢, 由于框架群的阻力作用, 在近框架群位置, 流速减小速率增大(见图 3)。

**3.2.2 阻力系数公式** 目前已有文献对透水框架当量粗糙度 $k_s$ 没有准确的定义方式,  $k_s$ 的大小与框架本身的特征长度、投放框架类型等有关。框架群平均高度 $\bar{y}$ 表征结构体高度平均化, 测量通过探针法实现, 均匀铺设一组密度下的框架群后, 通过探针分别测出水槽中测量点与框架接触点高程和槽底高程, 接触点高程减去槽底高程即可推算出该点处框架的高度。本试验在水槽方向上选取 8 个测量断面, 分别距出水口 1.0, 1.8, 2.6, 3.4, 4.0, 4.8, 5.6 和 6.4 m。每个断面选取的测量点分别距右岸 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 和 0.25 m, 共计 40 个测量点, 取均值记为框架平均高度, 如图 4 所示。

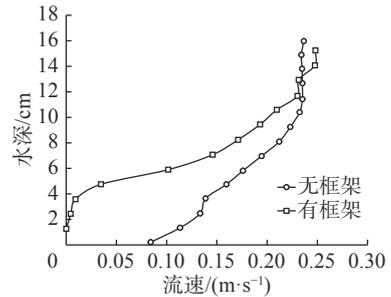


图 3 有无框架条件下断面流速分布( $Q=8$  L/s)

Fig. 3 Velocity distribution with and without frames ( $Q=8$  L/s)

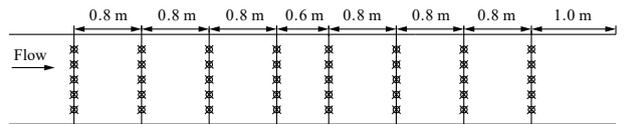


图 4 框架高度测量点示意

Fig. 4 Measurement for the average height of frames

本次研究中, 将测量的 $\bar{y}$ 作为 $y_0$ 的值, 利用 $y_0$ 推算 $k_s$ , 对于透水框架群研究, 仍取 $y_0 = 0.75k_s$ <sup>[9]</sup>。

处理 PIV 拍摄数据, 计算不同工况下框架群平均高度 $\bar{y}$ 以下的流量均值。计算结果显示底部透水层流量最高占总流量 18.1%, 平均占总流量的 8.19%, 故框架体内部流量不可忽略。定义透水框架孔隙率 $\phi$ :

$$\phi = 1 - V_{\text{tf}} / (y_0 BL) \quad (11)$$

式中:  $V_{\text{tf}}$  表示透水框架总体积;  $B$  为水槽宽度;  $L$  为框架铺设长度。定义透水框架单位体积迎流面粗糙元面积 $a$ <sup>[19]</sup>:

$$a = 1.5(1 - \phi / y_0) \quad (12)$$

高柱等<sup>[20]</sup>研究得出单一贴壁四面体透水框架拖曳力系数 $C_D$ 与雷诺数变化关系曲线, 考虑的雷诺数范围为 1 800~155 000, 本试验雷诺数范围为 25 000~50 000, 取 $C_D$ 数值为 1.567。将式(11), (12)和 $C_D$ 取值代入式(7)可得:

$$U_{\text{tot}} = \frac{1}{H} \left[ 2.828 \left( \frac{gi}{N} \right)^{1/2} h^{5/3} k_s^{-1/6} + 0.599 \sqrt{\frac{gi}{1-\phi}} \phi^{3/2} k_s^{3/2} \right] \quad (13)$$

上述参数代入式(10)。数据处理发现:当  $N = 0.576$ , 此时阻力系数平均相对误差绝对值最小。根据  $n = \sqrt{f/(8g)R}^{1/6}$  计算出糙率  $n$ , 比较测量值计算的流量  $Q$ , 阻力系数  $f$  和糙率  $n$  与推导公式计算的结果, 得出  $Q, f, n$  对应的平均相对误差分别为 7.05%, 14.53% 和 7.15%, 可见试验数据与推导公式符合度良好。

对于实际工程中宽浅型河道,  $R = h + y_0\phi$ , 即:

$$f_{\text{tot}} = \frac{(1+0.75\beta)^2(1+0.75\phi\beta)}{[1.318\beta^{1-6} + 0.212\phi^{3/2}(1-\phi)^{-1/2}\beta^{3/2}]^2} \quad (14)$$

式中:  $\beta = k_s/h = 4y_0/(3h)$ ,  $y_0$  通过测量框架体平均高度得出,  $h$  表示水深  $H$  与位移高度  $y_0$  之差。

由计算式(14), 可得  $n$  为:

$$n = \sqrt{f/8gR}^{1/6} = \frac{h^{1/6}(1+0.75\beta)(1+0.75\phi\beta)^{1/2}}{0.147\beta^{-1/6} + 0.024\phi^{3/2}(1-\phi)^{-1/2}\beta^{3/2}} \quad (15)$$

## 4 结 语

本文针对大尺度粗糙结构体实际底部过流情况, 概化提出新的双层流速分布形式。基于该理论, 得出考虑大尺度粗糙结构体在占用过水面积、同时底部透水层不可忽略透水量情况下的阻力系数计算式。通过调整形状系数, 透水框架群试验数据与推导式配型良好, 最终得出考虑底部过流条件下透水框架群阻力系数计算式。框架群的相对粗糙高度与孔隙率共同影响阻力系数大小。透水框架群当量粗糙度  $k_s$ 、零面位移高度  $y_0$  和入侵深度  $\delta_e$  的求解方法需要进一步研究。

## 参 考 文 献:

- [1] 唐洪武, 李福田, 肖洋, 等. 四面体框架群护岸型式防冲促淤效果试验研究[J]. *水运工程*, 2002(9): 25-28. (TANG Hongwu, LI Futian, XIAO Yang, et al. Experimental study on effect of scour prevention and sedimentation promotion of bank protection of tetrahedron penetrating frame groups[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2002(9): 25-28. (in Chinese))
- [2] 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): 65-68. (XU Xirong, LIU Gang, XU Songnian, et al. Experimental study on flood control and bank protection by tetrahedron permeable frames[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2007, 27(5): 65-68. (in Chinese))
- [3] 徐国宾, 张耀哲. 混凝土四面六边透水框架群技术在河道整治、护岸及抢险中的应用[J]. *天津大学学报*, 2006, 39(12): 1465-1469. (XU Guobin, ZHANG Yaozhe. Application of tetrahedron-like concrete penetrating frames in river improvement, bank protection and emergency work[J]. *Journal of Tianjin University*, 2006, 39(12): 1465-1469. (in Chinese))
- [4] 杨中华, 白凤鹏, 胡朝阳. 两种布置方式下的四面六边透水框架周边流场的PIV试验研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2014, 22(5): 877-886. (YANG Zhonghua, BAI Fengpeng, HU Zhaoyang. PIV experiments of flow around the tetrahedron frame under two different arrangements[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2014, 22(5): 877-886. (in Chinese))
- [5] WANG J M, YANG X G, ZHOU H W, et al. The effect of tetrahedron framed permeable weirs on river bed stability in a mountainous area under clear water conditions[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 4841.
- [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: 18-23. (LI Ruohua. Study on flow deceleration through frames made of hollow tetrahedron[D]. Nanjing: Hohai University, 2004: 18-23. (in Chinese))
- [7] YEN B C. Dimensionally homogeneous manning's formula[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1992, 118(9): 1326-1332.
- [8] BAYAZIT M. Free surface flow in a channel of large relative roughness[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1976, 14(2): 115-

126.

- [9] CHENG N S. Simple modification of manning-strickler formula for large-scale roughness[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 143(9): 04017031.
- [10] 乔昌凯, 刘兴年, 陈兴伟, 等. 卵石透水河床渗流阻力研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(增刊2): 36-40. (QIAO Changkai, LIU Xingnian, CHEN Xingwei, et al. Experimental study on the friction factor of permeable gravel bed[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2013, 45(Suppl2): 36-40. (in Chinese))
- [11] 苏萍, 李强. 大尺度粗糙水流特性的研究进展(综述)[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2000, 4(3): 253-273. (SU Ping, LI Qiang. Researching progress in flow characteristics of large-scale roughness[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2000, 4(3): 253-273. (in Chinese))
- [12] LI S L, SHI H R, XIONG Z W, et al. New formulation for the effective relative roughness height of open channel flows with submerged vegetation[J]. *Advances in Water Resources*, 2015, 86: 46-57.
- [13] PAN W H, LIU S H, HUANG L. Coupled three-layer model for turbulent flow over large-scale roughness: on the hydrodynamics of boulder-bed streams[J]. *Geomorphology*, 2018, 303: 122-132.
- [14] LÓPEZ R, BARRAGÁN J. Equivalent roughness of gravel-bed rivers[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 134(6): 847-851.
- [15] JACKSON P S. On the displacement height in the logarithmic velocity profile[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1981, 111: 15-25.
- [16] MOLION L C B, MOORE C J. Estimating the zero-plane displacement for tall vegetation using a mass conservation method[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1983, 26(2): 115-125.
- [17] 张雅静, 申向东. 植被覆盖地表空气动力学粗糙度与零平面位移高度的模拟分析[J]. 中国沙漠, 2008, 28(1): 21-26. (ZHANG Yajing, SHEN Xiangdong. Simulation analysis of vegetation covered surface's aerodynamics roughness length and zero displacement[J]. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(1): 21-26. (in Chinese))
- [18] GHISALBERTI M, NEPF H. Mass transport in vegetated shear flows[J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2005, 5(6): 527-551.
- [19] GHISALBERTI M. Obstructed shear flows: similarities across systems and scales[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2009, 641: 51-61.
- [20] 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. (GAO Zhu, YIN Jie, TANG Hongwu, et al. Three dimensional numerical simulation of external flow field around tetrahedron frame with a single attached wall[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(2): 161-166. (in Chinese))

## Resistance coefficient equation for permeable tetrahedron frames

LIU Jianhua<sup>1</sup>, YANG Zhonghua<sup>1</sup>, LI Da<sup>1</sup>, LI Ming<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Changjiang Waterway Institute of Planning and Design, Wuhan 430040, China)

**Abstract:** The study of resistance coefficient for permeable tetrahedron frames (PTF) with seepage effect is of practical significance. PTF were taken as large-scale roughness in this research. Using the penetration depth, a two-layer dynamic model was established for the turbulent flow over large-scale roughness. The flow was divided into two layers, the permeable layer and the free-flow layer, along the water depth. Considering roughness area and seepage effect in the bottom, the resistance equation was derived with this two-layer model. Flume experiments of PTF were conducted and results present that the vertical distribution of longitudinal velocity is S-shaped when frames are laid. The key parameter, shape factor, was calibrated by 47 sets of data with the Reynolds number ranging from 25,000 to 50,000.

**Key words:** permeable tetrahedron frames; large-scale roughness; two-layer model; resistance coefficient