

# 高棵水生植物的阻力系数在非淹没 与淹没条件下的相互换算

顾峰峰<sup>1</sup>，倪汉根<sup>2</sup>，戚定满<sup>1</sup>

(1. 上海河口海岸科学研究中心，上海 201201；2. 大连理工大学土木水利学院，辽宁 大连 116024)

**摘要：**通过模型试验测定了渠道中一种高棵、密集分布的植物，在淹没情况下的断面流量分布曲线及糙率和水深关系曲线；根据文献资料假设了植物区内的流速为均匀分布，并预测了非植物区内的流速分布，经过与实测值比较，符合较好；在这个断面流速分布的基础上，通过理论推导，得到了非淹没和淹没情况下糙率系数的换算关系；并给出了用植物模型在非淹没时的糙率系数~水深关系曲线延伸得到淹没时的糙率~水深关系曲线的实例，模型试验的结果也验证了这一换算关系。

**关键词：**高棵水生植物；阻力系数；流速分布；淹没；相互换算

**中图分类号：**TV131.2；X143 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-6791(2007)06-0823-06

水流经过植物时，将消耗大量的动量和能量，这时植物产生的阻力是主要阻力。由于湿地和天然河道的管理及行洪分析的需要，很多学者对植物产生的阻力进行了大量的研究分析。他们中大部分是以研究曼宁系数的特性为基础的。通常，高棵植物的糙率  $n$  不是常数<sup>[1]</sup>，而是随植物的类型、密度以及水流的深度和流速等不同而变化。研究  $n$  的特性，对淹没情况和非淹没情况通常都区别对待，因为，非淹没和淹没条件下水生植物的阻力特性是不一样的<sup>[2]</sup>。

在淹没条件下，通常认为阻力系数与雷诺数相关，20 世纪 50 年代以前的试验研究结果基本上都以  $n \sim Vh$  关系曲线的形式总结在 Chow 的明渠水力学<sup>[3]</sup>一书中，但是文献[4]指出，即使对于同一种植物，其  $n \sim Vh$  关系曲线也不唯一，因而使其应用具有局限性。一般认为淹没情况下糙率是随水深的增大而减小<sup>[1,4~6]</sup>，当水深较深时，植物区的高度相对很小，植物区的水流流动相对于植物区上面的水流来说可以忽略，这时  $n$  将趋向于某个常数<sup>[7]</sup>。还有一些相关的研究，如文献[8]中讨论了由于植物存在，对水位产生的影响，及流速对曼宁系数的影响，文献[9]对牧草的 Darcy-weisbach 及曼宁系数进行了测定。

非淹没条件下，也有很多学者通过试验进行了研究分析。如 Fathi-Maghadam 和 Kouwen<sup>[10]</sup>于试验室在过渡流和紊流流态条件下测定了单株松和杉在非淹没时的糙率系数，得到糙率随水深的增加而增加，但是耦合了一定的速度的影响。Petryk 和 Bosmajian<sup>[11]</sup>对小麦及高粱等植物进行糙率系数的实测，结果表明在非淹没情况下，糙率系数都随着水深的增大而增大，在淹没时小麦的糙率系数随水深的增大而减小。在文献[12,13]中利用模型，对一种湿地常见植物——芦苇，进行了阻力特性研究，其特点是高棵、密集分布，得到了不同密度、非淹没情况下的糙率计算公式，其值随水深增大而增大，和文献[11,14]中高粱、芦苇等高棵植物的实测结果较为一致。

在工程实际中，植物区既有淹没的工况，又有非淹没的工况；即使在同一湿地行洪计算中，也会同时出现两种情况，如洪水抵达植物区的初始时段，植物通常并未被完全淹没，而当水位逐渐升高时，植物才慢慢被淹没。因而工程需要能同时描述非淹没和淹没的糙率系数的计算模型，但很多试验，往往只给出淹没条件下或只给出非淹没条件下的结果，如果能根据需要建立这两种条件下糙率的换算关系将很有意义。本文根据文献资

收稿日期：2006-11-13；修订日期：2007-03-12

基金项目：国家自然科学基金重点项目（50139020）；中国近海海洋综合调查与评价 908 专项 B9

作者简介：顾峰峰(1978-)，男，上海市人，博士，主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: gufengfeng@yahoo.com.cn

料,假设植物区内的断面流速为均匀分布,利用已有的有植物存在时的流速分布曲线,预测了非植物区内的流速分布,与试验结果进行比较,显示两者符合较好;然后通过理论推导,得到了非淹没糙率系数和淹没糙率系数之间的转换关系。通过本文的方法,可在原来非淹没条件下糙率计算模型的基础之上,换算得到淹没状态下的糙率和水深的关系曲线。

## 1 有植物时的流速分布分析

非淹没情况下,由于植物的存在,加剧了植物区中流体微团的相互碰撞、掺混及动量传递,使得植物区时均流速分布较为均匀化,而不再符合对数流速分布规律。Temple<sup>[7]</sup>和文献[15~18]的试验研究结果表明,可假定植物区的断面流速基本保持常数,笔者以前研究<sup>[13]</sup>中的实测结果也证明了这一点。而且,由于植物的存在,水流的紊动强度通常会明显增强,根据文献[19]对植物的实测分析,其纵向和横向的紊动强度基本相当。

淹没的情况下,非植物区中水深方向的流速分布研究,大多是建立在对数分布的基础上。如 Kouwen<sup>[20]</sup>等在 Prandtl 混合长度基础上,提出了存在阻水物时流速的对数分布曲线描述公式:

$$\frac{v}{v_*} = \frac{v_k}{v_*} + \frac{1}{K} \ln \left( \frac{y}{k_v} \right) \quad (1)$$

式中  $K$  = 卡门(Karman)常数,通常取 0.4;  $y$  为离渠底的距离;  $k_v$  为弯曲植物的高度;  $v_k$  为对应  $k_v$  处的流速;  $v_*$  为摩阻流速。Temple<sup>[7]</sup>也通过 Prandtl 混合长度方法得到了另一个速度描述曲线,它假设了混合长度  $l$  为

$$l = (y - bk_v) \quad (2)$$

通过试验取参数  $b = 0.94$ 。根据混合长度理论有

$$= l^2 \left| \frac{dv}{dy} \right| \frac{dv}{dy} \quad (3)$$

水深为  $y$  处的剪应力  $\tau$  又可表示为

$$= g(h - y)i \quad (4)$$

$h$  为整个断面水深,  $i$  为底坡降。根据式(3)、式(4)有

$$\frac{dv}{dy} = \frac{\sqrt{gi}}{y - bk_v} \sqrt{h - y} \quad (5)$$

积分式(5)得整个断面速度分布公式<sup>[7]</sup>:

$$v = \begin{cases} v_1 & \text{当 } y \leq k_v \text{ 时} \\ v_1 + \frac{\sqrt{gi}}{K} \left[ 2 \sqrt{h - y} - \sqrt{h - k_v} - \sqrt{h - bk_v} \ln \left( \frac{\sqrt{h - bk_v} + \sqrt{h - y}}{\sqrt{h - bk_v} - \sqrt{h - y}} \right) + \sqrt{h - k_v} \ln \left( \frac{\sqrt{h - bk_v} + \sqrt{h - k_v}}{\sqrt{h - bk_v} - \sqrt{h - yk_v}} \right) \right] & \text{当 } y > k_v \text{ 时} \end{cases} \quad (6)$$

式中  $v_1$  为植物区的断面流速,取常数,  $y$  和  $k_v$  等参数含义同前。

## 2 糙率系数和水深的关系

### 2.1 非淹没和淹没条件下糙率系数的关系推导

下面通过已有的植物淹没时的速度分布公式(6),和非淹没时的糙率计算模型,推导计算淹没情况下的糙率系数和水深关系,各参数示意于图1。

对于整个过流断面来说,底面剪应力为

$$b_s = g h i_f \quad (7)$$

根据均匀流糙率公式  $n = \sqrt{\frac{h^{1/3}}{g \bar{v}^2}}$ ，则有

$$i_f = \bar{v}^2 n_{vs}^2 / h^{4/3} \quad (8)$$

$\bar{v}$  为整个断面的平均流速，其中  $n_{vs}$  为淹没时植物的等效糙率系数，由式(7)、式(8)也可得

$$b_s = \frac{g \bar{v}^2 n_{vs}^2}{h^{1/3}} \quad (9)$$

对于无植物区，其底部即植物顶端剪应力为

$$i = g h_2 i_f \quad (10)$$

由式(7)、式(10)得

$$i = \frac{h_2}{h} b_s \quad (11)$$

由非淹没时的糙率计算公式，得到淹没时渠底剪应力与非淹没时的糙率系数  $n_{vn}$  的关系：

$$n_{vn} = \sqrt{\frac{(b_s - i) h_1^{1/3}}{g \bar{v}_1^2}} = \sqrt{\frac{h_1^{4/3}}{b_s h}} \quad (12)$$

$\bar{v}_1$  为植物区的平均流速，由式(12)可得

$$b_s = \frac{n_{vn}^2 g \bar{v}_1^2 h}{h_1^{4/3}} \quad (13)$$

由于式(9) = 式(13)，所以

$$\frac{n_{vs}}{n_{vn}} = \frac{\bar{v}_1}{\bar{v}} \left( \frac{h}{h_1} \right)^{2/3} \quad (14)$$

因此，换算植物非淹没与淹没时的糙率需给定比值： $\frac{\bar{v}_1}{\bar{v}}$ 。

由式(7)、式(13)可得

$$i_f = \frac{n_{vn}^2 \bar{v}_1^2}{h_1^{4/3}} \quad (15)$$

把  $i$  代入式(6)后积分，可以得到断面单宽流量：

$$q = \bar{v} h = \bar{v}_1 h + \frac{n_{vn} \bar{v}_1 \sqrt{g}}{h_1^{2/3}} \left[ (h - b k_v)^{3/2} \ln \left[ \frac{\sqrt{h - b k_v} + \sqrt{h - k_v}}{\sqrt{h - b k_v} - \sqrt{h - k_v}} \right] - \frac{2}{3} (h - k_v)^{3/2} - 2(h - b k_v) \sqrt{h - k_v} \right] \quad (16)$$

由式(16)，得

$$\frac{\bar{v}_1}{\bar{v}} = h / c \quad (17)$$

系数  $c$  的表达如下：

$$c = h + \frac{n_{vn} \sqrt{g}}{h_1^{2/3}} \left[ (h - b k_v)^{3/2} \ln \left[ \frac{\sqrt{h - b k_v} + \sqrt{h - k_v}}{\sqrt{h - b k_v} - \sqrt{h - k_v}} \right] - \frac{2}{3} (h - k_v)^{3/2} - 2(h - b k_v) \sqrt{h - k_v} \right] \quad (18)$$

最后，把式(17)代入式(14)，可得非淹没和淹没时的糙率换算关系式：

$$\frac{n_{vs}}{n_{vn}} = \frac{h}{c} \left( \frac{h}{h_1} \right)^{2/3} \quad (19)$$

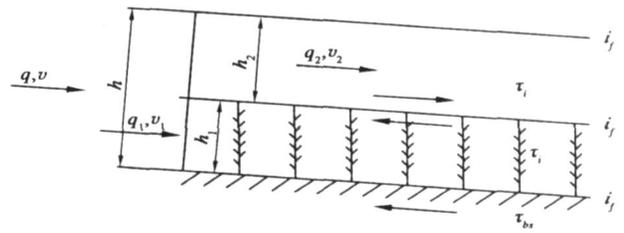


图 1 水生植物淹没示意图

Fig. 1 Scheme of submerged hydrophyte

2.2 流速分布曲线的测量及验证

试验条件如下：试验采用的水槽宽 0.4 m(设为  $x$  方向)，高 0.6 m(设为  $z$  方向)，长约 15 m(设为  $y$  方向)，模型植物每株直径尺寸约 0.003 m，叶子尺寸约 0.01 m  $\times$  0.07 m，叶子数为每株均匀分布 5 片，植物高度约 0.36 m，植物在水槽中为均匀排列，密度为 1250 株/ $m^2$ ；模型的尺寸参照松嫩流域扎龙湿地夏秋季现场采样的芦苇，按长度比尺  $\lambda_1=4$  进行制作。试验流量取 20 L/s 和 30 L/s 两个工况，水深用尾门调节，在约 0.1~0.6 m 范围内变化。雷诺数按式  $Re = \frac{vh}{\nu}$  计算，当取  $h$  为水深，对应于 20 L/s、30 L/s 两种流量时的水流雷诺数分别约为 43898 和 65847。当取  $h$  为植物杆直径时，得到的雷诺数范围见图 2。流速使用比托管进行测量，测量断面取在水槽中心( $x$  方向)，沿水深( $z$  方向)进行测量。本试验中弗劳德数的取值范围见图 3，水流条件均属于缓流范围。通常植物区最顶部区域的流速较大，和植物区内部并不一致，所以，植物高度一般取一个有效高度  $k_v$ ，即取植物实际高度  $h_1$  乘上一影响因子  $p$ <sup>[16]</sup>，得  $k_v = p h_1$ ，本试验取值  $p=0.889$ ，有效高度  $k_v=0.32$  m。

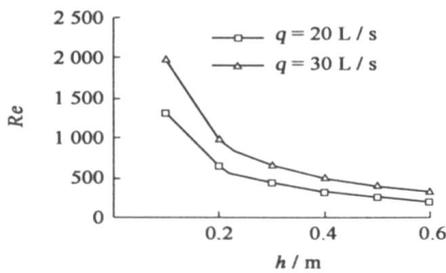


图 2 试验雷诺数范围

Fig. 2 Variation of  $Re$  with flow depth

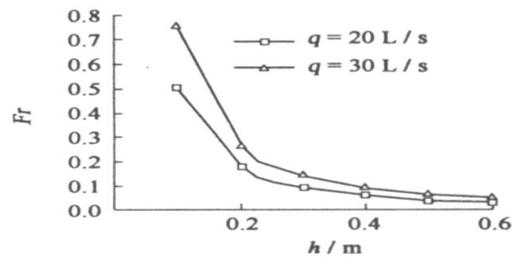


图 3 试验弗劳德数范围

Fig. 3 Variation of  $Fr$  with flow depth

在给定流量时，联合求解式(6)、式(15)和式(16)，可计算得到过流断面完整的流速分布。试验结果与利用式(6)流速分布进行计算的结果比较绘于图4、图5中。在植物区，测量结果和式(6)的描述曲线有偏差(见图4)，分析其主要原因有两个：一是由于使用比托管测量植物区流速时，会受到植物的干扰；二是由于植物区流速较小，比托管的测量误差影响增大。在非植物区，两图表明通过式(6)的计算值和试验值两者符合较好，说明用式(6)来描述有植物时的过流断面完整的流速分布是可靠的。

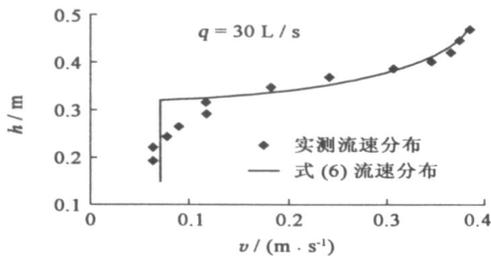


图 4 流量 30L/s 时实测和计算的流速分布

Fig. 4 Comparison of experimental and assumed velocity profile with  $q=30L/s$

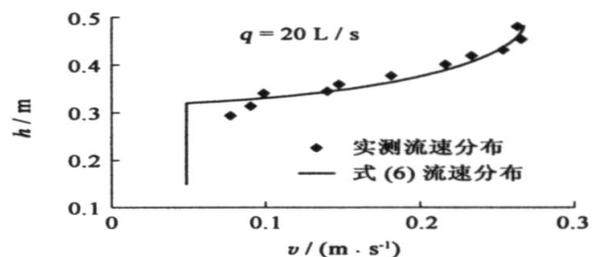


图 5 流量 20L/s 时实测和计算的流速分布

Fig. 5 Comparison of experimental and assumed velocity profile with  $q=20L/s$

2.3 糙率水深关系曲线的计算和验证

非淹没情况时，对于不同密度条件下，文献[12, 13]中已经通过模型试验的方法，对现实中的一种高棵、密集分布的植株，分析得到了一个计算糙率水深关系的模型，关系式如下：

$$\left. \begin{aligned} n &= (0.69h - 0.2436) / \dots + (n_b + 0.2436 / \dots) \exp(-ch) \\ \frac{\partial n}{\partial h} &= 0.69 / \dots - c(n_b + 0.2436 / \dots) \exp(-ch) \\ &= \sqrt{\frac{N_1}{N_2}}, N_1 = 156 \text{ 株} / \text{m}^2 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中 参数  $c$  取为 2.4;  $n_b$  取为 0.05。本文取了原型密度为 156 株/ $\text{m}^2$  和 78 株/ $\text{m}^2$  的植物的糙率水深关系曲线。本文的植物模型和式(20)中的原型植物相比较, 长度比尺  $l = 4$ , 所以, 对应于本文试验中的模型植物的密度分别为 2500 株/ $\text{m}^2$  和 1250 株/ $\text{m}^2$ 。模型的糙率可通过下式进行转换得到<sup>[12]</sup> :

$$n_{VP} = \frac{1}{l} n_{VM} \quad (21)$$

式中  $n_{VP}$  为原型的等效糙率系数;  $n_{VM}$  为模型的等效糙率系数。

根据式(19)、式(20)和式(21), 可以得到从非淹没到淹没条件下, 模型植株的糙率随水深的变化关系。对两种密度的模型植株, 从非淹没状态到淹没状态的糙率水深变化曲线的计算结果见图 6。图 6 中同时给出了密度为 1250 株/ $\text{m}^2$  的条件下, 通过本文模型试验得到的糙率和水深关系的试验结果, 试验值与计算值符合良好, 验证了本文中推导的转换关系。

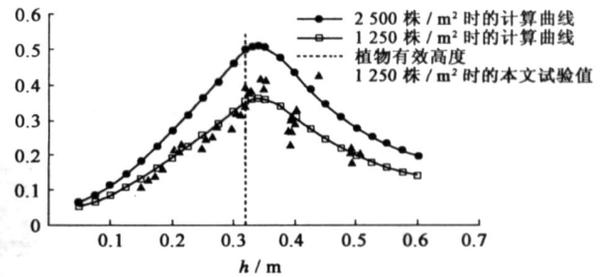


图 6 糙率水深关系曲线的计算结果和与试验结果的验证  
Fig.6 Comparison of experimental and calculated  $n \sim h$

### 3 结 论

(1) 淹没情况时, 对于存在高棵密集分布植物的渠道, 本文假设植物区内的断面流速为均匀分布, 并利用文献资料给出的有植物存在时的流速分布曲线, 预测了非植物区内的流速分布, 并分别通过两个工况的试验结果进行了验证。

(2) 利用已得到的断面流速分布, 建立了一种高棵密集分布的植物在非淹没和淹没时糙率系数的换算关系, 给出了用模型植物非淹没时糙率水深关系延伸得到淹没时糙率水深关系的实例, 并通过试验结果对这一换算关系进行了验证。

#### 参考文献:

[1] Kadlec R H. Overland Flow in Wetlands:Vegetation Resistance[J]. J Hydraul Engng, 1990, 116(5): 691 - 706.  
 [2] Ree W O. Retardation Coefficients for Row Crops in Diversion Terraces[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1958, 1: 78 - 80.  
 [3] Chow V T. Open channel hydraulics[M]. New York: McGraw-Hill, 1959.  
 [4] Wilson C A M E, Horritt M S. Measuring the flow resistance of submerged grass[J]. Hydrol Process, 2002, 16: 2589 - 2598.  
 [5] Wu F C, Shen H W, Chou Y J. Variation of Roughness Coefficients for Unsubmerged and Submerged Vegetation[J]. J Hydraul Engng, 1999, 125(9): 934 - 942.  
 [6] Wilson C A M E, Stoesser T, Bates P D, et al. A. Open channel flow through different forms of submerged flexible vegetation[J]. J Hydraul Engng, 2003, 129(11): 847 - 853.  
 [7] Temple, Darrel M. Velocity Distribution Coefficients for Grass-Line Channels[J]. J Hydraul Engng, 1986, 112(3):193 - 205.  
 [8] 叶一隆, 朱家民, 陈智谋. 布袋莲对渠槽曼宁系数之影响[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1127 - 1132.  
 [9] 潘成忠, 上官周平. 牧草对坡面侵蚀动力参数的影响[J]. 水利学报, 2005, 36(3):371 - 377.  
 [10] Fathi-Maghadam M, Kouwen N Nonrigid. Nonsubmerged, vegetative roughness on floodplains[J]. J Hydraul Engng, 1997, 123(1): 51 - 57.

- [11] Petryk S, Bosmajian G. Analysis of Flow through Vegetation[J]. Proc ASCE, 1975, 101(7): 871 - 884.
- [12] 倪汉根, 顾峰峰. 湿地非淹没芦苇水流阻力的试验研究[J]. 水动力学研究与进展(A), 2005, 20(2): 167 - 173.
- [13] 顾峰峰, 倪汉根. 芦苇密度与阻力的关系[J]. 水动力学研究与进展(A), 2006, 21(5): 626 - 631.
- [14] James C S, Birkhead A L, Jordanova A A. Flow resistance of emergent vegetation[J]. J Hydraulic Research, 2004, 42(4): 390 - 398.
- [15] Carollo F G, Ferro V Termini. Flow velocity measurements in vegetated channels[J]. J Hydraul Engng, 2002, 128(7): 664 - 673.
- [16] Kutijia V, Hong H T M. A numerical model for assessing the additional resistance to flow introduced by flexible vegetation[J]. J Hydraul Res, 1996, 34(1): 99 - 114.
- [17] Rowinski PaweL M Kubrak Janusz. A mixing-length model for predicting vertical velocity distribution in flows through emergent vegetation[J]. Hydrological Sciences Journal, 2002, 47(6): 893 - 904.
- [18] 李艳红, 赵 敏. 含植物河流动力学试验研究——流速、摩阻流速及曼宁糙率系数垂线分布[J]. 水动力学研究与进展, 2004, 19(4): 513 - 519.
- [19] 杨克君, 刘兴年, 曹叔尤, 等. 植被作用下的复式河槽漫滩水流紊动特性[J]. 水利学报, 2005, 36(10): 1263 - 1268.
- [20] Kouwen N, Unny T E, Hill H M. Flow retardance in vegetated channels[J]. J Irrig Drain Div, Am Soc Civ Eng, 1969, 95(2): 329 - 342.

## Transition of long-stalk vegetation resistance coefficient between unsubmerged condition and submerged condition \*

GU Feng-feng<sup>1</sup>, NI Han-gen<sup>2</sup>, QI Ding-man<sup>1</sup>

(1. Estuary and Coastal Scientific Research Institute of the Ministry of Communication, Shanghai 201201, China;

2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract :** The vertical velocity distributions in the vegetated channel and the relationship between resistance coefficient and flow depth were measured in laboratory experiments. Based on the assumption that the velocity in the region with vegetation keeps constant, the velocity distributions above the top of vegetation may be well predicted which closely fit the results of the experiment. And then the relationship between the resistance coefficient and flow depth for the vegetations under the unsubmerged and submerged conditions is deduced theoretically. Finally an example is given that the relationship between  $n$  and  $h$  for reeds is extended successfully from unsubmerged to submerged condition, and some experimental results approve such a conversion.

**Key words :** long-stalk vegetation; resistance coefficient; velocity distribution; submerged; transition

---

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50139020).