

文章编号: 1673 - 9469(2014) 03 - 0064 - 04

doi: 10. 3969/j. issn. 1673 - 9469. 2014. 03. 016

## 淹没刚性植物水流纵向流速垂向分布研究

郝文龙, 朱长军, 常向萍

(河北工程大学 城市建设学院, 河北 邯郸 056038)

**摘要:** 根据室内水槽试验和理论分析, 提出了一种两层模型(植物层和植物层以上区域)来预测含淹没刚性植物水流纵向流速垂向分布。对于植物层以上区域, 采用了与修改的混合长度理论相结合“新的植物边界层”的概念去分析, 并提出了一个预测在这个区域水流的流速垂向分布模型。对于植物层, 通过拟合试验数据给出了解析式。最后, 通过试验结果分析, 这种预测淹没刚性植物水流流速垂向分布的两层模型与结果具有很好的一致性。

**关键词:** 两层模型; 淹没刚性植被; 流速垂向分布

**中图分类号:** TV131.2

**文献标识码:** A

## Research on vertical distribution of longitudinal velocity in the flow with submerged vegetation

HAO Wen - long, ZHU Chang - jun, CHANG Xiang - ping

(College of Urban Construction, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China)

**Abstract:** Based on the indoor flume experiment and theoretical analysis, a two - layer model (i. e. the vegetated layer and the upper non - vegetated layer) is proposed to predict the vertical distribution of longitudinal velocity in the flow with submerged vegetation. For the upper non - vegetated layer, a modified mixing length theory combined with the concept of the new vegetation boundary layer was adopted, and an analytical model was presented to predict the vertical velocity distribution in this region. For the vegetated layer, the analytical solution was presented by fitting the experimental data. Finally, by analyzing the experimental results, the two - layer model is in good agreement with the results.

**Key words:** two - layer model; rigid submerged vegetation; vertical flow profile

生态河道越来越受到人们的重视,植物河道是生态河道的一部分。河道种植植物可以缓冲水流,降低流速和对陆地的侵蚀速度,植物根系可以吸收氮磷等营养物质,净化水质,修复河流生态系统,增强河道护岸的稳定性。但是河道种植植物也存在着不少问题。植物的存在增加了河床的阻力,使河道的水位升高,水流的平均流速减小,不利于河道过流,影响了河道的输水和泄洪能力。因此,探讨植被与水流之间的相互影响,理解植被与水流之间相互作用的机理对河道的建设具有重要意义。

由于各研究者试验中所选模拟植物的形状、

排列方式、刚度、淹没度等因素的不同,水流纵向流速沿垂线分布大致存在两种观点。一种是两区划分<sup>[1-3]</sup>,两区划分将流速分布分为植物层和植物层以上区域。一种是三区划分<sup>[4-10]</sup>,三区划分将流速分布分为植物底部的黏性底层区、植物层和植物层以上区域。植物层以上区域流速基本满足对数分布,其他区域由于各区界限取值不同,并未得到完全的统一,分布规律也不尽相同,所以很难得到统一的流速分布公式。本文提出了一种预测淹没刚性植被明渠流垂直速度分布的模型,并通过试验证明了该模型的准确性。

收稿日期: 2014 - 05 - 13

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(项目编号: E2012402013)

特约专稿

作者简介: 郝文龙(1988 -),男,河北邯郸人,硕士研究生,从事水环境方面的研究。

### 1 试验概况

本试验是在河北工程大学水利馆内的水槽中进行的。水槽布置如图 1 所示。水槽长 7 m, 宽 0.5 m, 高 0.5 m。两边为玻璃壁面, 中间为铺满小石子的底面, 纵向底坡坡度可以利用升降螺杆进行调节。槽首设有进水阀门, 水流经过消能栅, 稳定后进入水槽, 水槽上设有活动支架, 以固定测速设备。槽尾设有平板闸门, 调节平板闸门开度可控制水槽水位。为了严格控制水位, 在水槽沿程布置了 2 个水位计。

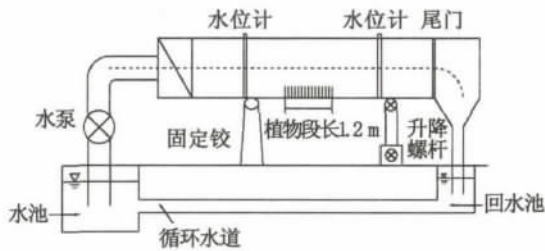


图1 试验循环矩形水槽布置图  
Fig.1 The experimental re-circulating open-channel rectangle flume

天然植物不管是柔性的还是刚性的, 其自然特性非常复杂, 而且不易固定, 不易用来在变坡水槽中进行试验测量。因此, 本文用 PVC 圆棒来模拟刚性植物, 圆棒直径  $D = 1\text{ cm}$ , 高  $h_v = 8\text{ cm}$ , 试验过程中植物始终处于完全淹没状态, 见图 2。试验中植物与植物之间的距离设定为  $L_x = 9\text{ cm}$ ,  $L_y = 8.2\text{ cm}$ , 见图 3。流速的测量选用 ADV( 三维超声波多普勒测速仪), Takemura 和 Tanaka<sup>[10]</sup> 发现在研究有植物河道的水力特征时, 测量的位置是一个非常重要的因素, 为了比较这种效果, 本文选择了两个典型的位置进行测量, 点 A 和点 B, 见图 3。在两个位置的垂线上, 从水底开始每隔  $0.5\text{ cm} - 1\text{ cm}$  距离测量一个流速, 直到水面。

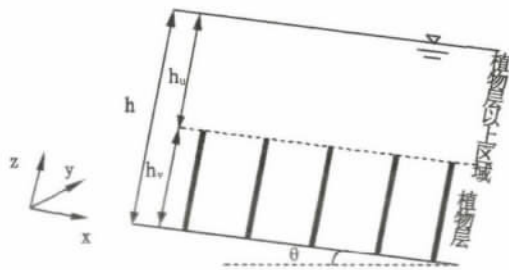


图2 两层模型图  
Fig. 2 Sketch of a two-layer model

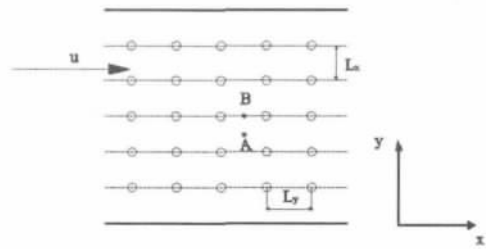


图3 水槽俯视图  
Fig.3 Plan view of the channel bed

试验将模拟植物固定在 PVC 板上, 无需其他固定设备。固定后放水进行测量发现, 圆棒底部稳定性较好, 没有出现滑落。试验水力学特征参数及植物特征参数参见表 1。

表 1 试验水力学特征参数及植物特征参数

Tab.1 Parameters of the hydraulic characteristics and plant characteristics

工况	流量 /L · S <sup>-1</sup>	水深 /cm	植物直 径/cm	植物高 度/cm	植物密度 /l · cm <sup>-2</sup>	底坡
工况 1	12	10	1	8	0.014	0.0035
工况 2	18.91	11	1	8	0.014	0.004

### 2 结果与讨论

#### 2.1 植物层流速分析

植物层周围流体所受的力有切应力, 重力和植物的拖拽力, 因此, 稳定流时的动量方程可以表示为

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} + \rho_0 g S_0 - \frac{1}{2} \rho_0 C_D m D u^2(z) = 0 \quad (1)$$

式中  $\tau$  - 切应力;  $\rho_0$  - 水的密度;  $C_D$  - 拖拽系数;  $m$  ( $m = 1 \cdot (L_x L_y)^{-1}$ ) - 植物的密度 ( $1 \cdot \text{m}^{-2}$ );  $S_0$  ( $S_0 = \sin\theta$ ) - 底坡。

一旦边界条件确定, 植物层的流速垂向分布就被确定。植物的存在使得黏性项可以忽略不计。对于此区域, 由于忽略了黏性切应力, 所以只包含雷诺切应力。

$$\tau = -\rho_0 \overline{u'w'} = -\rho_0 \overline{u'w'}|_{z=h_v} \exp[a(z-h_v)] = \rho_0 g h_v S_0 \exp[a(z-h_v)]$$

把上面的等式带入式(1), 得

$$u = \sqrt{2gS_0 \{ ah_v \exp[a(z-h_v)] + 1 \} / (C_D m D)} \quad (2)$$

从式(2)可以看出, 一旦式中各参数确定, 流速的垂直分布便可算出。

## 2.2 植物层以上区域流速分析

新的河床不能不考虑河床糙率对水流结构的影响。在分析植物层以上区域流速分布时,黏性切应力可以被忽略,但是雷诺切应力应该被考虑进去。

在植物层以上无植物稳定流时,忽略了黏性项的  $x$  方向上的动量方程可以表示为

$$gS_0 - \partial_0 \overline{u'w'} / \partial z = 0 \quad (3)$$

将式(3)从植物顶部到某一水深进行积分,积分后得到

$$-\overline{u'w'} = gS_0(h-z) \quad (4)$$

根据混合长度理论<sup>[11]</sup>,式(4)的左半部分可以表示为

$$-\overline{u'w'} = l^2 (\partial u / \partial z)^2 \quad (5)$$

式中的混合长度  $l$  由 Righetti 和 Armanini<sup>[12]</sup> 提出。

$$l = [l_0 + \kappa(z - h_v)] \sqrt{1 - (z - h_v) / h_u} \quad (6)$$

式中  $l_0$  - 界面处的混合长度值,  $\kappa$  - 冯卡曼常数,取 0.41。

求解上述方程,纵向流速可以表示为

$$u = u^* \left\{ \frac{1}{\kappa} \ln [1 + \kappa(z - h_v) / l_0] + C \right\} \quad (7)$$

式中  $u^*$  ( $u^* = \sqrt{gh_u i_v}$ ) - 界面处的剪切流速;  $C$  - 常数值,可以通过界面处的连续条件确定。

$$C = \sqrt{2(ah_u + 1) / C_D m D h_u} \quad (8)$$

把式(8)带入式(7),可得

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left[ 1 + \frac{\kappa(z - h_v)}{l_0} \right] + \sqrt{2(ah_u + 1) / C_D m D h_u} \quad (9)$$

## 3 应用

要把上述模型应用到试验中,需要知道拖拽系数  $C_D$ 、常数  $\alpha$  和界面处的混合长度  $l_0$  三个参数的数值。这三个参数数值的确定可以用以下式子确定。

1) 拖拽系数  $C_D$  可以采用 Schlichting<sup>[13]</sup> 提出的式子确定

$$C_D = 3.07 Re_p^{-0.168} \quad Re_p < 800$$

$$C_D = 1.0 \quad 800 \leq Re_p < 8000$$

$$C_D = 1.2 \quad 8000 \leq Re_p < 10^5$$

式中  $Re_p$  特征雷诺数,  $Re_p = uD \cdot v^{-1}$ , 其中  $\nu$  流体的粘度。本论文中,  $C_D$  取值 1.0。

2) 分别分析在点 A 和点 B 的测量数据,采用最小二乘法确定  $\alpha$  的值。分析之后的结果如下。

工况 1 ( $Q = 12 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $h = 10 \text{ cm}$ ):  $\alpha_{1A} = 18.1$ ,  $\alpha_{1B} = 19.7$ 。

工况 2 ( $Q = 18.91 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $h = 11 \text{ cm}$ ):  $\alpha_{1A} = 19.5$ ,  $\alpha_{1B} = 18.3$ 。

虽然这两种情况的流量和水深不同,但是  $\alpha$  取值的变化范围在 18 - 20 之间。在解式(2) - 式(9)时,  $\alpha$  取平均值 18.9。

3)  $l_0$  是植物层和植物上层接触界面的混合长度值,它表示在湍流扩散过程中的积分尺度。理论上,植物的高度和相对厚度 ( $h_v^2 \cdot (L_x L_y)^{-1}$ ) 都会影响  $l_0$  的数值。作为一种半经验方程,式(9)中  $l_0$  的取值可以引用 Righetti and Armanini<sup>[12]</sup> 建议的区域。

工况 1  $l_0 \cdot h_v^{-1} = 0.12$ ,  $l_0 = 0.0128 \text{ m}$ 。

工况 2  $l_0 \cdot h_v^{-1} = 0.25$ ,  $l_0 = 0.0425 \text{ m}$ 。

4) 结果:通过上述参数的确定,淹没刚性植物条件下植物层流速垂向分布可以被计算出来,计算值与实验值的分布图见图 4。

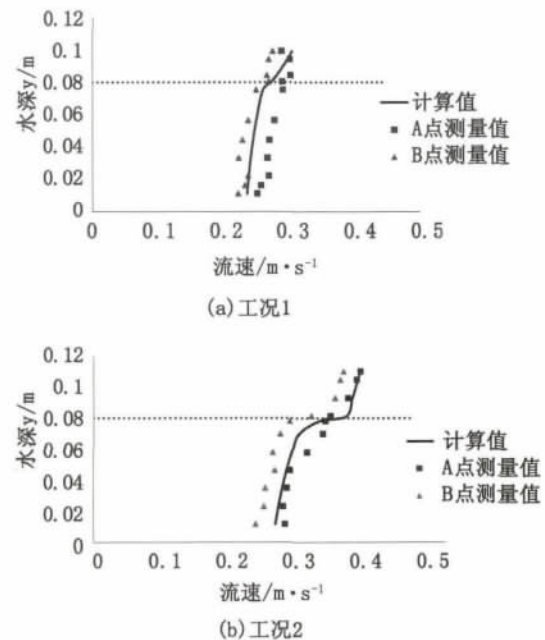


图4 计算结果与试验数据比较  
Fig. 4 Comparison between measured and the analytical result

从图 4 可以看出,虽然实测数据点有一定的离散型,但总体还是按照一定的曲线变化,计算结果与实际情况拟合较好。这说明本文提出的两层模型可以很好的用来预测淹没刚性植被条件下的流速垂向分布。

## 5 结论

1) 含淹没刚性植物明渠的水流流速垂向分布的两层模型和试验测得的数据拟合较好,能够很好的反映植物间流速的分布变化,重演水深范围内流速分布规律。

2) 在探究流速的变化规律时, $\alpha$ 是一个比较关键的参数,在本研究中, $\alpha$ 是根据实验数据得出来的,而且结果表明, $\alpha$ 是随着植被的高度和密度的变化而变化的。

### 参考文献:

- [1] KOUWEN N, UNNY T E, HILL H M. Flow retardance in vegetated channels [J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1969, 95( IR2 ): 329 - 342.
- [2] STEPHAN U, GUTKNECHT D. Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation [J]. Journal of Hydrology, 2002( 269 ): 27 - 43.
- [3] LOPEZ F, GARCIA M H. Mean flow and turbulence structure of open - channel flow through non - emergent vegetation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127( 5 ): 392 - 402.
- [4] GOURLAY M R. Discussion of 'Flow resistance in vegetated channels' by Kowen N [J]. Journal of Irrigation and Drainage Division, 1970, 96( IR3 ): 351 - 357.
- [5] EIYAKIM O, SALAMA M M. Velocity distribution inside and above branched flexible roughness [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1992, 118( 6 ): 914

(上接第63页) 整体内涵品味,挖掘深厚文化底蕴,建设兼具安居乐业的田园乡村和高效宜居的美丽城镇的全面宜居城市。

### 参考文献:

- [1] 甄峰, 黄朝永. 国内城乡一体化研究进展与思考 [J]. 城市问题, 1999( 2 ): 47 - 49.
- [2] 刘易斯·芒福德. 城市发展史 [M]. 倪文彦, 宋峻岭译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.
- [3] 埃比尼泽·霍华德. 明日的田园城市 [M]. 金经元译. 北京: 商务印书馆, 2000.
- [4] EMILY TALEN. Charter of new Urbanism, Congress for New Urbanism, Charleston, South Carolina [M]. 1996.
- [5] FERNAND MAGALHAES, MARIO DURAN. Low carbon cities: Curitiba and Brasilia [R]. 45th ISOCARP Congress 2009.

- 927.

- [6] CAROLLO F G, FERRO V, TERMINI D. Flow velocity measurements in vegetated channels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128( 7 ): 664 - 673.
- [7] GHISALABERTI M, NEPF H M. Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows [J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107 ( C2 ): doi: 10.1029/2001JC000871.
- [8] GHISALABERTI M, NEPF H M. The limited growth of vegetated shear layers [J]. Water Resources Research, 2004, 40, doi: 10.1029/2003WR002776.
- [9] OKAMOTO T A, NEZU I. Turbulence structure and "Monami" phenomena in flexible vegetated open - channel flows [J]. Journal of Hydraulic Research, 2009, 47( 6 ): 798 - 810.
- [10] TAKEMURA T, TANAKA N. Flow structures and drag characteristic of colony - type emergent roughness model mounted on a flat plate in uniform flow [J]. Fluid Dyn Res 2007, 39( 9 - 10 ): 694 - 710.
- [11] ROWINSKI PM, KUBRAK J. A mixing - length model for predicting vertical velocity distribution in flows through emergent vegetation [J]. J Hydrol Sci, 2002, 47( 6 ): 893 - 904.
- [12] RIGHETTI M, ARMANINI A. Flow resistance in open channel flows with sparsely distributed bushes [J]. J Hydrol, 2002, 269( 1 - 2 ): 55 - 64.
- [13] SCHLICHTING, H. Boundary - layer Theory, 7th ed. New York: McGraw - Hill, 1979.

(责任编辑 刘存英)

- [6] 张文忠. 宜居城市的内涵及评价指标体系探讨 [J]. 城市规划学刊, 2007( 3 ): 30 - 34.
- [7] 李业锦, 张文忠, 田山川, 等. 宜居城市的理论基础和评价研究进展 [J]. 地理科学进展, 2008, 27( 3 ): 101 - 107.
- [8] 甄峰, 郑俊, 罗绍荣. 城市宜居性评价及规划建设途径 - 以广东清远为例 [J]. 城市问题, 2009( 10 ): 29 - 34.
- [9] 顾文选, 罗亚蒙. 宜居城市科学评价标准 [J]. 北京规划建设, 2007( 1 ): 7 - 10.
- [10] 吕传廷, 何磊, 王冠贤, 等. 广州宜居城市规划建设思路及实施策略 [J]. 规划师, 2010, 26( 9 ): 29 - 34.
- [11] 董晓峰, 杨保军. 宜居城市研究进展 [J]. 北京规划建设, 2008, 23( 3 ): 323 - 326.

(责任编辑 王利君)