

基于掺长理论的淹没柔性植被水流 流速分布研究*

槐文信, 韩杰, 曾玉红, 安翔, 钱忠东

(水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉大学, 武汉 430072)

(刘宇陆推荐)

摘要: 采用 PVC 薄片对柔性植被进行了模拟, 并用三维 Micro ADV 对淹没柔性植被恒定水流进行了实验测量, 获得了水流纵向流速和 Reynolds 切应力的分布. 实验结果表明, 淹没柔性植被水流植被层和非植被层的水力特性有显著不同. 在非植被层, Reynolds 应力为直线分布, 而时均流速则符合经典的对数律分布. 基于新“河床”的概念, 首次提出用河道压缩参数来表示植被对水流的影响, 并合理假设了一个新的混合长度公式, 由此得到的时均流速公式相比前人的成果有所需参数少、计算简单及实用性强等优点.

关键词: 柔性植被; PVC 薄片; Micro ADV(多普勒超声测速仪); 混合长度; 主流流速分布; Reynolds 应力; 河道压缩参数

中图分类号: TV133.1 文献标识码: A

引言

天然河道中存在水生植被, 这些植被可以净化受污染的水体, 还可以产生氧, 是水环境中重要的组成部分, 对于生态修复起到尤为重要作用. 但同时这些植被将为河道带来一些不利的影响, 例如增加河床的阻力, 使河道的水位升高, 这降低了河道的行洪能力. 河道种树对水流的影响是有利有弊^[1], 需根据具体情况来分析. 根据其生态学特征, 水生植被可以分为刚性植被和柔性植被. 两者的区别在于, 水流流经柔性植被时, 植被顶部及其枝叶的摆动使水流更加紊乱, 动量、质量的交换更加充分, 并且流速与阻力的变化关系和刚性植被的情况有所不同^[2]. 本文研究的是柔性植被对河道水流的影响.

由于测量手段的限制, 早期的研究者把柔性植被(如草类)简单地视为河道阻力的一部分, 着重研究不同植被水流条件下阻力系数的变化^[3]. 其中以 α -VR 法^[4] 影响最大, 虽然 Kouwen 等^[5] 指出 α -VR 法不适用于底坡小于 5% 时的情况, 但近年来众多学者仍然沿用这个思路, 并得到了一些很实用的公式^[6], 这些公式对设计人工渠道、估算河道的平均流速及流量有很好的指导意义.

但河道植被(特别是大型植被)的摆动扰乱了水流, 使水流的紊动特性与没有植被时相比

* 收稿日期: 2008-09-03; 修订日期: 2008-11-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50679061; 50709025; 50749031)

作者简介: 槐文信(1963—), 男, 陕西乾县人, 教授, 博士生导师(联系人). Tel: + 86-27-68772211; E-mail: wxhuai@whu.edu.cn.

显得更难了解^[7],这对泥沙的沉降^[8]和污染物的扩散^[9]都造成了不可忽视的影响,因此需要对植被水流的紊动结构有更详细的描述,即需要知道纵向流速和 Reynolds 应力的分布规律.随着在测量中引入能精确测量脉动流速的 ADV 和能测量流场的 PIV,对植被水流结构的研究方法越来越多,并发展出了各种模型.一种比较简单的方法是,先考虑单株植被对水流的影响,通过质量和动量的守恒原理建立数学模型,然后再将植被丛对水流的影响叠加^[10-11],这样的方法思路简单,但结果是否满足可叠加性则有待证实.更加普遍的作法是,对选定的流层取空间平均,然后根据 N-S 方程建立 Reynolds 应力和 $k-\varepsilon$ 紊流模型^[12]、LES 大涡模型^[13]及双平均模型^[14]等各种数学模型并求得相应的数值解,目前的结果均与实测数据吻合较好.

对植被水流的理论研究大多采用普朗特的混合长度理论,即将非植被层水流视为与植被层相对的整体流层,给出合适的混合长度公式,可以得到主流时均流速的垂向分布符合对数律的重要结论.但对于柔性植被,由于混合长度与具体的植被水流条件(如植被的平均高度、弹性模量等相关,前人所提出的表达式中往往会引入另外的难以确定的未知参数^[15-18],这给这些公式的广泛应用带来了极大的不便.本文借鉴前人的研究成果,根据柔性植被水流的特点合理假设混合长度的表达式,试图简化纵向流速垂向分布的求解方法.

1 实验的建立

由于缺乏精度较高的完整的数据系列,故本文采用能精确测量脉动流速的 Micro ADV 对植被水流进行测量.实验在武汉大学水力学实验室的长直循环玻璃水槽中进行的,水槽长 20.00 m,宽 0.50 m,深 0.50 m,槽底坡度为 0.4‰.槽首有稳流箱及电磁流量计,其中稳流箱稳定来流,保证实验中恒定流的条件;电磁流量计能测定流量,精度为 0.1 L/s.水槽末端设有可调节高度的尾门以控制水槽中的水位.根据前人的研究成果^[6]估算曼宁(Manning)系数约为 0.09~0.15,然后计算出相应的均匀流水深;实验时通过尾门调整水位并用探针测量上下游水位差,使水深及水面坡降符合均匀流条件,实验中的水面比降控制在 0.35‰~0.45‰之间.

流速测定采用美国 SonTek 公司制造的声学多普勒(Doppler)流速仪(Micro ADV).Micro ADV 能精确快速测量三维流速,最高可测速度为 360 cm/s,最小可测速度为 0.0 cm/s,精度为 ± 0.25 cm/s,采样频率最大为 50 Hz.对 Micro ADV 的介绍和工作原理的详细介绍可参考相关文献^[19].本次实验中模拟柔性植被的 PVC 片顶部的摆动周期目测大约为 5 s,故采样时间定为 30 s;同时采样频率取最大的 50 Hz 以保证测量精度.

实验采用 PVC 薄片模拟柔性植被,每棵植株由 3 片 PVC 薄片组成,每片薄片长 10 cm,宽 0.5 cm,厚 0.15 cm. PVC 薄片的好处在于它具有较好的韧性,可以很好地模拟河岸灌木等柔性植被的生物学型态. PVC 薄片种植在厚 0.1 m,长 2.0 m,宽 0.5 m 的塑料平板上,塑料平板一共 4 块,故实验植被段总长为 8 m,测量时选靠下游的位置以保证植被水流条件的稳定性.实验中植株排列方式为水平排列,植株间距在沿流向(x)及垂流向(y)上均有 3 种尺度(5 cm, 10 cm, 15 cm),每种间距下进行 2 组不同工况实验.主流方向和所采用的坐标系、植被的排列方式以及测点的布置示意分别如图 1 所示,注意图中 A, B, C 3 个测点是以水槽中间的植被为基准,以使边壁的影响最小.纵向剖面图及实验水槽装置图分别如图 2 和图 3 所示,具体实验工况见表 1.

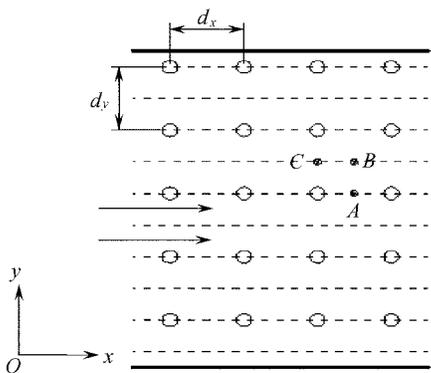


图1 植被排列及测点布置示意图

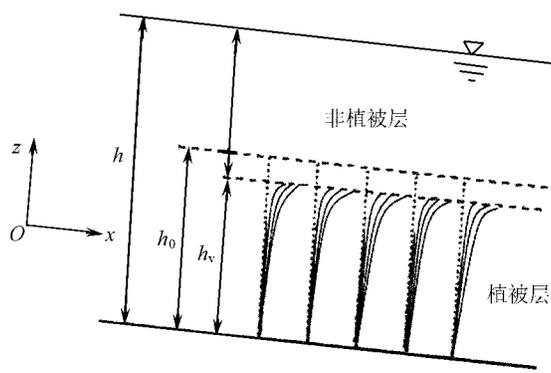


图2 纵向剖面示意图

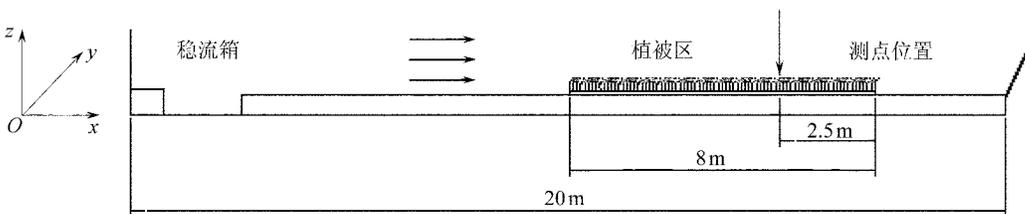


图3 实验水槽示意图

表 1

实验组次和实验工况表

工况	$(d_x \times d_y) / \text{cm}^2$	流量 $Q / (\text{L} / \text{s})$	水深 h / cm	植被高度 h_v / cm	相对淹没度 h / h_v
1	5×10	24.4	29.8	8.7	3.45
2	5×10	30.8	33.0	8.5	3.88
3	10×5	28.1	25.2	8.0	3.15
4	10×5	35.1	32.8	8.0	4.10
5	10×10	24.3	25.6	8.5	3.01
6	10×10	36.3	35.5	8.5	4.17
7	10×15	25.5	27.5	8.5	3.24
8	10×15	30.0	31.0	8.4	3.69
9	15×10	24.5	26.4	8.5	3.10
10	15×10	30.2	31.7	8.5	3.73

2 实验结果及理论分析

2.1 Reynolds 应力分布实验研究

将植被层看作一种尺度较大的粗糙物并将其视为河床的一部分,相应地把非植被层水流视为这个“河床”上的流动^[20].按照这个假设,理论上该“河床”上水流的 Reynolds 应力应与普通河床上的一样符合线性分布,且最大值出现在“河床”底部(即植被顶部).新“河床”与一般河床的一个重要区别是,新“河床”的底部并不是真正的近壁区,不用考虑粘性切应力.根据恒定均匀流切应力与水力坡度的关系得到新“河床”的假设下 Reynolds 应力最大值为 $\tau'_{yx} = \tau'_0 = \sqrt{R'}J$, 其中 τ'_0 为植被顶部处的切应力, R' 为新“河床”的水力半径,取为 $R' = h - h_v$, J 为水面比降,计算时统一取为 0.4 ‰.图 4 和图 5 为部分工况下 Reynolds 应力分布图,图中斜虚线为

非植被层理论 Reynolds 应力值, 其最大值为 $\nu(h - h_v)J$.

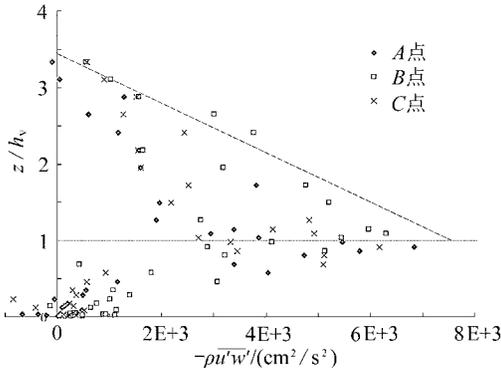


图4 工况1植株间距 5×10 各点 Reynolds 应力图

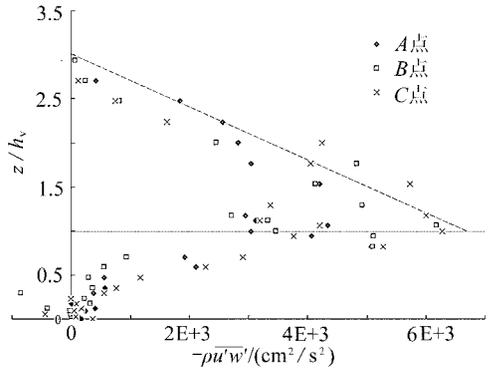


图5 工况5植株间距 10×10 各点 Reynolds 应力图

图4和图5说明, Reynolds 应力的分布符合线性律, 最大值出现在植被顶部附近, 并与上面分析的最大值基本一致, 可见新“河床”的假设对柔性植被是可行的. 这些结论将应用在后面流速公式的推导中.

植被层的情况较为复杂, 影响 Reynolds 应力的因素包括: 1 水流在植被顶部的 KH 不稳定性 (Kelvin-Helmholtz instability 产生涡体^[21]), 并影响植被层物质的垂向交换; 2 水流绕过植被产生涡体, 并影响整个植被层物质的横向交换. 对刚性植被, 绕流涡体的强度只与流速有关; 对柔性植被, 绕流涡体的强度则还与植被的倒伏角度有关, 倒伏角度越大, 涡体强度越弱.

根据两种涡体的影响大小, 可以将植被层分为上部与下部两部分. 植被层上部主要受 KH 涡的影响, 由顶部摆动所产生的紊动能占据主导地位. Reynolds 应力向下呈减小的趋势, 说明越远离顶部 KH 涡的影响越小, 从图4及图5中可以看出, 顶部产生的涡体在大约0.5倍植被高附近不再显著影响水流. 而0~0.5 h_v 的区域内 Reynolds 应力出现部分负值, 说明植被层下部存在绕流涡体, 由单个植株的影响而产生的紊动占据主导地位.

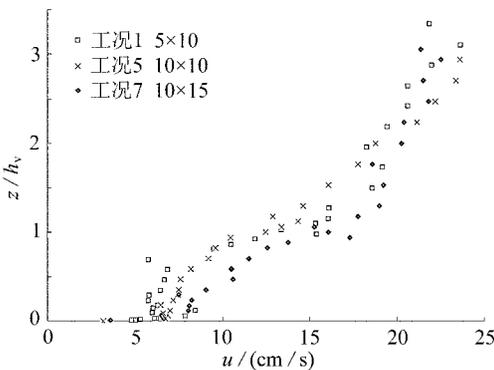


图6 植被纵向间距变化时 A 点流速分布比较

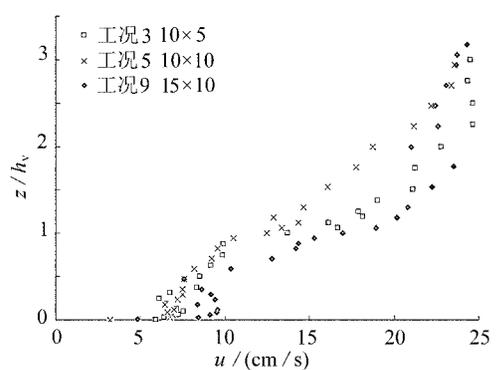


图7 植被横向间距变化时 A 点流速分布比较

2.2 时均流速分布研究

图6及图7是实验测得各工况下测点A的纵向流速沿水深分布图. 从图中容易看出, 时均流速沿垂向分布的图形在植被顶部附近有一个拐点, 因此可以将水流分为植被层与非植被层两层来研究. 在植被水流条件接近的情况下, 非植被层水流流速大小也较接近, 说明植被的

排列变化对该层水流的影响较小。下面将从理论上分析非植被层水流流速的垂向分布问题。

根据受力平衡原理, 可以写出淹没植被非植被层水流在恒定均匀流条件下的方程

$$\partial \tau / \partial z + \rho g i_b = 0. \tag{1}$$

忽略粘性应力, 则(1 式中 $\tau = -\rho \overline{u'w'}$ 为 Reynolds 应力, i_b 为底坡, 在均匀流条件下可取为水面坡降, 即 $i_b = J$ 。对上式在植被上层从水面向下至 z 积分(z 轴方向朝上, 可导出 Reynolds 应力的分布关系式

$$-\rho \overline{u'w'} = \rho g J (h - z). \tag{2}$$

对(2 式左侧的 Reynolds 应力, 根据 Prandtl 的混合长度理论有

$$-\overline{u'w'} = l^2 (\partial u / \partial z)^2. \tag{3}$$

如 2.1 节中所提到的, 植被水流的上层区域好像是在由植被所形成的新“河床”上流动, 原来的河道水流好像被“压缩”了, 本文认为混合长度的表达式应该反应这种“压缩”, 并假设了一个新的混合长度表达式:

$$l = \left[\frac{h - h_v}{h} \right] \kappa \left[\frac{\tau}{\tau_{\max}} \right]^{1/2}, \tag{4}$$

上式中的 $(h - h_v)/h$ 反应河道的“压缩”情况, 我们将其倒数 $h/(h - h_v)$ 称为河道压缩参数。显然该参数越小, “压缩”河道就越接近无植被河道, “压缩”程度也就越小。实际上这个混合长度的表达式对植被层上部也同样适用。 κ 为 von Karman 常数, 在计算中取 0.4。

将式(2 至(4 联立并利用 2.1 中分析得到的植被顶部关系: $-\rho \overline{u'w'}|_{z=h_v} = \gamma(h - h_v)J$, 可以得到

$$u = \left[\frac{h}{h - h_v} \right] u_* \left\{ \frac{1}{\kappa} \ln \left[\frac{z}{h_v} \right] + C \right\}, \tag{5}$$

其中, u_* 为植被顶端处的摩阻流速, 即 $u_* = \sqrt{g(h - h_v)J}$ 。Jarvela^[22] 在研究了柔性植被的流速分布之后, 认为以 $\sqrt{g(h - h_v)J}$ 来定义柔性植被顶部的摩阻流速能得到最好的结果。

式(5) 中 C 为待定常数, 需要一个边界条件来确定, 可通过流速在植被层顶端的流速为 u_{h_v} 得到

$$C = \frac{u_{h_v}}{u_*} \left[\frac{h - h_v}{h} \right], \tag{6}$$

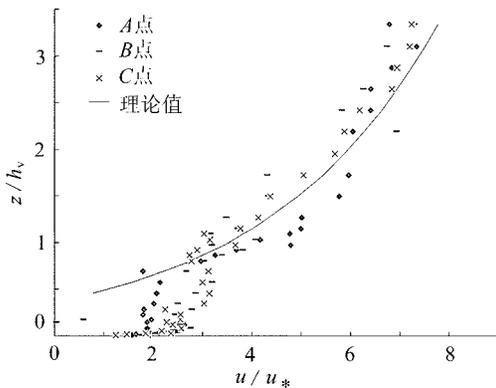


图 8 工况 1 不同测点流速实测值与计算值比较

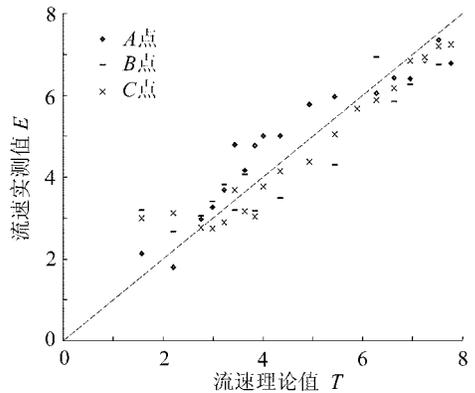


图 9 工况 1 不同测点流速实测值与计算值误差比较

代入式(6)可得

$$\frac{u}{u_*} = \left(\frac{h}{h - h_v} \right) \frac{1}{K} \ln \frac{z}{h_v} + \frac{u_{h_v}}{u_*} \quad (7)$$

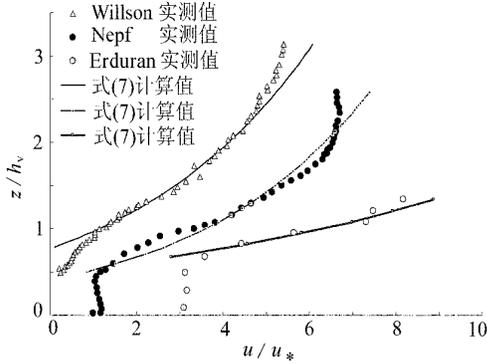


图 10 3种实测数据系列与式(7)理论计算值比较

式(7)中即为柔性植被水流非植被层流速的垂向分布表达式, 需要通过与实测数据的比较来验证公式的适用性, 限于篇幅, 图8和图9只给出工况1的比较情况. 图8为工况1三处测点的实测流速与式(7)计算值的比较, 图9为实测值与由式(7)所计算的理论值的误差比较(只对0.5倍植被高以上的数据进行比较). 可以看到在非植被层水流中理论值与实测值吻合良好, 说明式(7)计算的理论值是准确的; 且在 $0.5h_v \sim 1.0h_v$ 的水流层内式(7)仍然能与实测值吻合, 说明对本文用PVC所模拟的柔性植被, KH涡的影响下限在 $0.5h_v$ 附近. 事实上正是因为柔性植被具有随水流倒伏的

性质, 所以植被层中仍然有一部分水流与非植被层水流一样符合对数律.

为了进一步验证式(7)的适用性, 图10给出了Willson^[23-25]等人在柔性植被水流中测得的流速分布与式(7)计算值的比较图, 其中计算所必需的参数如表2所示, 其它相关参数参考相应文献. 由于各数据系列的流速水深的量级不尽相同, 故将流速水深全部无量纲化. 可以看到对非植被层水流, 计算结果与实测数据吻合较好; 对植被层水流, 计算值与理论值在 $0.5h_v \sim 1.0h_v$ 的范围内仍能大致吻合. 这与由本文试验所得的结论一致, 即对柔性植被, 非植被层和植被层上部水流的主流流速符合对数分布.

表 2 数据系列及各系列理论计算所需参数

数据系列	系列 1	系列 2	系列 3
作者及引用文献	Wilson ^[23]	Nepf ^[24]	Erduran ^[25]
水深 h / cm	28.90	46.70	23.86
植被高度 h_v / cm	8.50	16.00	15.30
水面比降 J / ‰	1.0	0.2	0.87

与前人所得到的表达式相比, 式(7)的优越性在于表达式中没有引入另外的未知参数, 在保证恒定均匀流的条件下(甚至不需要严格满足, 只需知道植被水流的水深、植被倒伏高度、水面比降3个基本参数, 再加上相关的边界条件(例如植被顶部平均流速)就可以得到与实际情况相吻合的主流流速分布, 具有计算简单、实用性强等优点.

3 结 论

1 本文用三维ADV对淹没柔性植被水流的测量结果表明, 对于垂向流速和Reynolds应力的分布, 水流以植被顶端为界划分为植被层和非植被层两个区域. 对于非植被层, 可将其看做“压缩”河道, 由此得到的Reynolds应力符合直线律, 同时主流流速也符合对数律, 这和前人对有植被河道水流研究的成果是一致的;

2 柔性植被的存在影响了纵向流速和Reynolds应力的垂向分布. 实验表明: 植被的弯曲

高度所对应的位置也就是紊动强度和 Reynolds 应力最大的地方。按照 KH 涡及绕流涡的强弱作用, 植被层还可细分为上部与下部, 分界线大约在 $0.5h_v$ 高度处, 植被层上部主要受 KH 涡的影响, 下部主要受绕流涡的影响。而正是因为柔性的影响, 故植被层上部水流与非植被层水流一样符合对数律;

3 对于非植被层流速的理论分析, 本文首次提出了用压缩参数 $h/(h-h_v)$ 来表示柔性植被对水流的影响并给出了一个新的混合长度表达式, 得到了纵向水流流速的解析解, 即式(7)。相比起前人所得到的成果, 式(7)只需要 3 个参数, 再给定一个边界条件即可得到非植被层水流的流速分布情况, 有很强的实用价值。

[参 考 文 献]

- [1] 黄本胜, 赖冠文, 邱静, 等. 河滩种树对行洪影响试验研究[J]. 水动力研究与进展, 1999, **14**(2): 468-473.
- [2] Fathi-Moghadam M, Kouwen N. Nonrigid, nonsubmerged, vegetative roughness on flood plains[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, **123**(1): 51-57.
- [3] Thompson G T. A theory of flow resistance for vegetated channels[D]. Washington: Washington State University, 1974.
- [4] Ree W O. Hydraulic characteristics of vegetation for vegetated waterways[J]. Agricultural Engineering, 1949, **30**: 184-187, 189.
- [5] Kouwen N, Li R M, Simons D B. Flow resistance in vegetated waterways[J]. Water Resources and Management, 1981, **24**(3): 684-690, 698.
- [6] WU Fu-chun, Hsieh Wen Shen. Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, **125**(9): 934-942.
- [7] 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.
- [8] Elliot A H. Settling of fine sediment in a channel with emergent vegetation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, **126**(8): 570-577.
- [9] DENG Zhi-qiang, Vijay P Singh, Lars Bengtsson. Longitudinal dispersion coefficient in straight rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, **127**(11): 919-927.
- [10] LI Jia-chun, LIU Qing-quan, ZHOU Ji-fu. Environmental mechanics research in China[J]. Advances in Applied Mechanics, 2003, **39**(2): 217-306.
- [11] 拾兵, 曹叔尤. 植物治沙动力学[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 2000.
- [12] Neary V S. Numerical solution of fully developed flow with vegetative resistance[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2003, **129**(5): 558-563.
- [13] JIE Cui. LES study of turbulent flows with submerged vegetation[J]. Journal of Hydraulic Research, 2008, **46**(3): 307-316.
- [14] Nikora Vladimir, Ian McEwan, Stephen McLean, et al. Double-averaging concept for rough bed open-channel and overland flows: theoretical background[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, **133**(8): 873-883.
- [15] Buschmann M H. New mixing-length approach for the mean velocity profile of turbulent boundary layers[J]. Journal of Fluids Engineering, 2005, **127**(2): 393-396.
- [16] Zhou J F, Liu Q Q, Li J C. Mixing Process in Estuaries[J]. Science in China, Ser A, 1999, **42**(10): 1110-1120.

- [17] Stephan Ursula, Gutknecht Dieter. Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation[J]. Journal of Hydrology, 2002, **269**(1): 27-43.
- [18] 王忖. 有植被的河道水流实验研究[D]. 硕士学位论文. 南京: 河海大学, 2003.
- [19] 盛森芝, 徐月亭, 袁辉靖. 近十年来流动测量技术的新发展[J]. 力学与实践, 2002, **24**(5): 1-14.
- [20] Righetti M, Armani A. Flow resistance in open channel flows with sparsely distributed bushes[J]. Journal of Hydrology, 2002, **269**(1): 55-64.
- [21] Ghisalberti Marco, Nepf H M. Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows[J]. Journal of Geophysical Research, 2002, **107**(2): 3-1-3-11.
- [22] Jarvela Juha. Effect of submerged flexible vegetation on flow structure and resistance[J]. Journal of Hydrology, 2005, **307**(1/4): 233-241.
- [23] Wilson C A M E, Stoesser T, Bates P D, et al. Open channel flow through different forms of submerged flexible vegetation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, **129**(11): 847-853.
- [24] Nepf H M, Vivoni E R. Flow structure in depth-limited, vegetated flow[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, **105**(C12): 28 547-28 557.
- [25] Erduran K S, Kutija V. Quasi-three-dimensional numerical model for flow through flexible, rigid, submerged and non-submerged vegetation[J]. Journal of Hydroinformatics, 2003, **5**(3): 189-202.

Study on Velocity Distribution of Flow With Submerged Flexible Vegetations Based on Mixing-Length Approach

HUAI Wen-xin, HAN Jie, ZENG Yu-hong,
AN Xiang, QIAN Zhong-dong

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science,
Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China)

Abstract: Choosing PVC slice to simulate the flexible vegetation, the laboratory experiments were carried out in an open channel with submerged flexible vegetation, and 3D acoustic Doppler velocimeter (Micro ADV) was introduced to measure the local flow velocities and Reynolds stress. The result showed that the hydraulic characteristics in the non-vegetation layer and the vegetation layer are totally different. In the region above the vegetation, Reynolds stress' s distribution is linear; meanwhile, measured velocity' s profile is a classical logarithmic one. Based on the concept of new "riverbed", the river compress parameter which represented the impact of vegetation on river was given for the first time and a new mixing length expression was assumed with reason. The formula of time-averaged velocity deduced from the mixing length expression had advantages of less parameters needed, simple calculation and useful application.

Key words: flexible vegetation; PVC slice; Micro ADV; mixing-length approach; stream-wise velocity distribution; Reynolds stress; river compressed parameter