

潮汐河工模型三角块梅花形加糙试验研究及其应用

徐 华, 夏益民, 夏云峰, 王晓航

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 通过水槽均匀流试验, 研究了三角块不同粘贴方向、厚度、布置间距和水深条件下若干种粘贴方案加糙糙率。根据试验结果, 推导了三角块正向、反向梅花形粘贴糙率计算式, 计算值与实测值偏差在 10% 以内。将三角块梅花形加糙研究成果应用于长江河口段模型, 模型潮位和流速均与实测值基本一致, 模型能较好地复演天然水流运动规律。

关 键 词: 潮汐河工模型; 糙率; 阻力相似; 三角块梅花形加糙; 正向粘贴; 反向粘贴

中图分类号: TV143.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2007)04-0055-07

Research on roughness of quincunx-pasted triangle blocks and its application in tidal river model

XU Hua, XIA Yi-min, XIA Yun-feng, WANG Xiao-hang

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Previously roughness blocks such as gravels, cross plates and bar objects could not meet the need of roughness, however, triangle blocks can do it ideally. The main influencing factors on roughness of quincunx-pasted triangle blocks are as following: thickness, lateral distance, portrait distance, water depth and pasted direction (forward: vertex meeting current; backward: bottom meeting current). Based on uniform water experiments in the flume, roughness of all kinds of pasted schemes is obtained. Based on the experiment result, when L is equal to P , semi-empirical and semi-theoretical forward formula and backward formula are deduced for computing roughness, and comparing computing values with experiment values, error range is within 10%. It indicates that the formulas have good accuracy. The research in this paper on Quincunx-pasted triangle blocks is applied to the model of the estuary reach of the Yangtze River from Jiangyin to Wusongkou. The verification test of tidal level and velocity indicates that tidal level and velocity in both prototype and model are basically identical, and the model can simulate water flow better.

Key words: tidal river model; roughness; resistance similarity; quincunx-pasted triangle blocks roughness; forward pasted; backward pasted

收稿日期: 2007-03-09

作者简介: 徐 华(1980-), 男, 江苏盐城人, 硕士, 主要从事河口治理、航道整治及涉水工程影响研究。

E-mail: xuh@nhri.cn

河工模型是研究江河治理、航道整治、河滩海涂围垦等工程问题的主要手段之一。河工模型可分为定床和动床两种;按几何相似与否,可分为正态和变态模型;按水流运动要素是否随时间变化,可以分为恒定流和非恒定流模型。由于河流海岸尺度大,而试验场地面积有限,大多河工模型都为变态模型。变态河工模型中,原型和模型之间要求满足阻力相似,这就需要人工加糙^[1]。20 世纪 30 年代,尼库拉兹对人工粗糙管道的阻力特性进行了试验研究,得出了人工粗糙管道中阻力系数 λ 的变化规律。蔡格士大^[1]曾于 1934 ~ 1935 年间进行明槽中人工砂粒的阻力试验,得出了明槽中阻力系数 λ 的变化规律。李昌华等^[2]总结物理模型加糙颗粒无间距排列和有间距加糙两种方式。张有龄^[1]等研究了密排加糙问题。卢汉才等^[3]对于梅花形贴石子的加糙效果做过试验研究,得出了加糙糙率与石子的粒径、粘贴间距之间的关系图,发现了糙体加糙并非越密越好。唐存本^[4]也研究了梅花形有间距大颗粒加糙的问题,得到唐存本糙率计算公式。罗肇森等^[5]研究了人工加糙糙率的计算方法,从河床阻力的可加性原理出发,总结得出各种人工加糙方法河床糙率的计算公式。梁斌等^[6]设计并论证了梅花形十字板加糙方法。D. W. Knight 等^[7]对人工条形加糙进行了阻力试验,发现条形块体间距为块体高度的 8 倍时,河床阻力达到最大。

潮汐河工模型属于非恒定流模型。李浩麟^[8]认为潮汐河口河床阻力主要由形状阻力(包括床面沙浪、沙洲浅滩以及弯道弯曲断面不规则等所产生的阻力)、粘性阻力和潮流惯性阻力三部分组成。在模型试验中,发现潮汐河流涨落潮阻力存在一定的差异。由此,在定床潮汐河工模型中就要求模型加糙糙率大小随水流运动方向的改变而不同,而以往石子、条形杆等加糙体都不能满足这个要求。为了解决定床潮汐河工模型加糙难题,陈志昌等^[9]提出了采用等腰三角橡皮块加糙的方法。由于三角橡皮块正反粘贴方向的不同(假设三角橡皮块顶点迎流为正向,三角橡皮块底边迎流为反向),模型加糙糙率大小也不相同,可满足潮汐河道模型加糙的要求。另外,三角橡皮块加糙体同其他加糙体相比,具有易于采购和加工制作、易于粘贴、易于调整、形状规则、加糙美观等优点。

目前,人们对三角块加糙糙率大小及其计算方法尚不清楚,以前主要采用类似块体的计算公式或根据经验估算加糙糙率,具有一定的偏差。为此,作者通过水槽均匀流试验,研究了三角块梅花形加糙糙率大小,推导糙率计算公式,为今后模型加糙提供计算依据。

1 试验水槽布置及试验方案

1.1 试验水槽及量测设备

试验水槽长 30 m,宽 2 m,深 0.5 m,底坡 $i=0.000\ 47(1/2100)$ 。水槽由砖砌而成,槽底和槽壁内用水泥抹光,以减小糙率。在水槽中部选取长为 27 m 的一段作为试验段,首部留 2 m、尾部留 1 m 作为过渡段。试验水槽由量水堰、消能静水段、过渡段、试验段、尾水段及退水渠组成。

水槽试验流量 $Q=0 \sim 200\ \text{L/s}$;水深 $h=7.0 \sim 22.3\ \text{cm}$;流速 $V=0.15 \sim 0.45\ \text{m/s}$,雷诺数 $Re=12\ 000 \sim 85\ 000$;佛汝德数 $Fr=0.15 \sim 0.45$ 。

水位用固定式测针测量,流速采用光电式旋桨流速仪测量。为了尽可能准确地测量水面比降,水槽两侧对称布置 14 个测针。试验前,对水槽床面未加糙糙率 n_f 以及水槽内流速分布进行了均匀流率定试验,得出床面糙率 $n_f=0.010\ 5$,水槽内流速分布均匀,主流不摆动,水槽可应用于试验研究。

1.2 试验方案

三角块正向、反向梅花形粘贴布置见图 1。试验主要研究三角橡皮块粘贴方向、厚度 Δ 、水深 h 以及布置间距 L 、 P 对加糙糙率 n 的影响。试验所用的三角橡皮块平面形状为等腰三角形,腰长 3 cm,底边长 2 cm。

对不同粘贴方向、不同厚度、不同水深及布置间距进行组合,试验方案见表 1。总共有 14 组试验组合(其中,正向 7 组,反

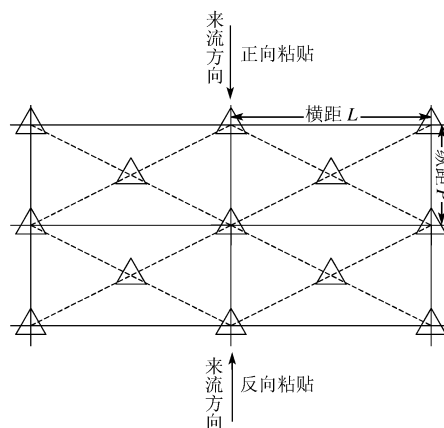


图 1 三角块正、反向梅花形粘贴布置
Fig. 1 Forward and backward layouts of quincunx-pasted triangle blocks

向7组),70个试验方案.

表1 三角橡皮块正(反)向粘贴试验方案

Tab.1 Experiment plans of quincunx-pasted triangle blocks in forward or backward directions

试验组合	橡皮块厚度 Δ / mm	横距 L / cm	纵距 P / cm	水深 h / cm
第1组	10	5	5	7.2、10.0、13.9、16.2和22.3
第2组	10	7.5	7.5	7.2、10.0、13.9、16.2和22.3
第3组	10	10	10	7.2、10.0、13.9、16.2和22.3
第4组	10	15	15	7.2、10.0、13.9、16.2和22.3
第5组	10	20	20	7.2、10.0、13.9、16.2和22.3
第6组	5	15	15	7.2、10.0、13.9、16.2和22.3
第7组	15	15	15	7.2、10.0、13.9、16.2和22.3

2 试验结果分析及计算式推导

2.1 试验结果分析

根据各种试验方案,计算得三角块正向、反向梅花形粘贴糙率大小见表2.

表2 三角块正向、反向梅花形粘贴糙率

Tab.2 Roughness of quincunx-pasted triangle blocks in forward and backward directions

$L \times P / (\text{mm} \times \text{mm})$	水深 h / cm				
	7.2	10.0	13.9	16.2	22.3
5×5(10 mm)	0.022 0/0.023 6	0.020 6/0.022 3	0.019 9/0.021 3	0.019 0/0.020 4	0.018 5/0.019 6
7.5×7.5(10 mm)	0.024 6/0.026 7	0.023 2/0.025 2	0.021 9/0.023 7	0.021 0/0.023 0	0.019 5/0.022 0
10×10(10 mm)	0.023 0/0.026 1	0.021 1/0.024 2	0.020 0/0.023 0	0.018 8/0.022 2	0.018 0/0.021 0
15×15(10 mm)	0.018 9/0.021 0	0.017 4/0.019 3	0.016 7/0.018 1	0.016 1/0.017 5	0.015 7/0.016 9
20×20(10 mm)	0.016 2/0.017 6	0.015 1/0.016 5	0.014 6/0.015 9	0.014 3/0.015 4	0.014 0/0.015 0
15×15(5 mm)	0.016 0/0.016 5	0.015 0/0.015 5	0.014 6/0.015 0	0.014 3/0.014 8	0.014 1/0.014 5
15×15(15 mm)	0.023 0/0.026 5	0.021 0/0.024 0	0.020 0/0.022 8	0.019 1/0.021 8	0.018 0/0.021 0

注:()中数值为加糙橡皮块的厚度;“/”前数字为三角块正向粘贴,后为三角块反向粘贴所对应的糙率.

2.1.1 水深 h 对糙率 n 的影响 将三角块正、反向粘贴时的糙率与水深关系点绘于图2(a)和(b).由图2可见,当三角块布置方式一定时,加糙糙率 n 随水深 h 的增大而减小,且随水深增加而减小的幅度越来越小,糙率 n 最终将趋于一个定值.

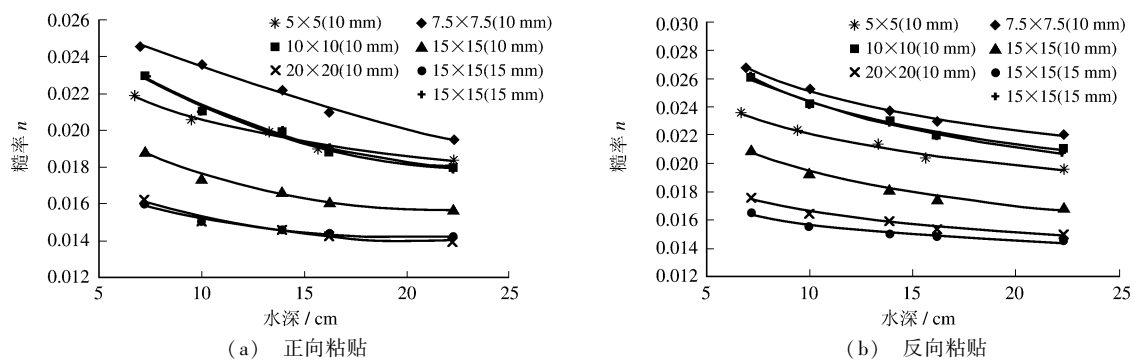


图2 三角块正向、反向梅花形粘贴糙率 n 随水深 h 的变化

Fig.2 Roughness variation in different water depth in forward and backward directions

2.1.2 三角块厚度 Δ 对糙率 n 的影响 为了研究厚度 Δ 对糙率 n 的影响,做了同一种布置方式(15 cm×15 cm),三角块厚度分别为5、10和15 mm的三组试验,正向、反向粘贴三角块时试验结果见图3.由图3可

见,当三角块布置方式和水深 h 一定时,糙率 n 随着厚度 Δ 的增大而增大,并且糙率 n 随厚度 Δ 增大的幅度越大. 另外,水深 h 越小,糙率 n 随厚度 Δ 增大的幅度越大.

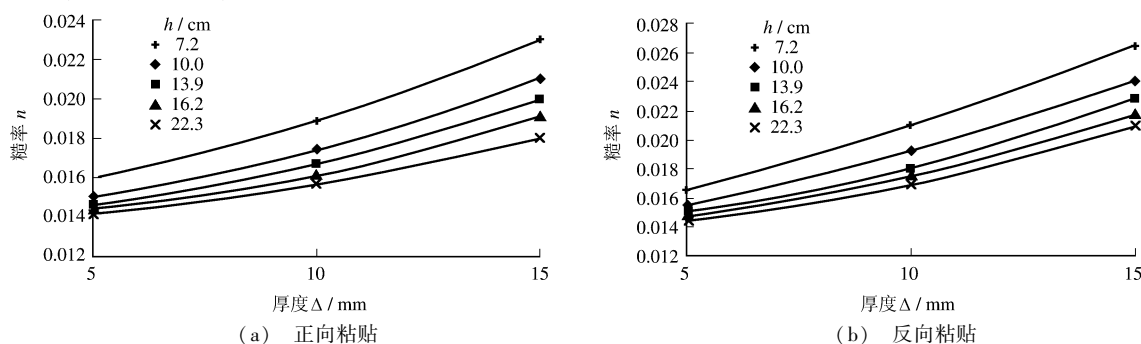


图 3 三角块正向、反向梅花形粘贴糙率 n 随厚度 Δ 的变化

Fig. 3 Roughness variation in different block thickness in forward and backward directions

2.1.3 三角块粘贴间距 P 对糙率 n 的影响 三角块厚度为 10 mm 时,正向和反向粘贴时的糙率随间距的变化见图 4.

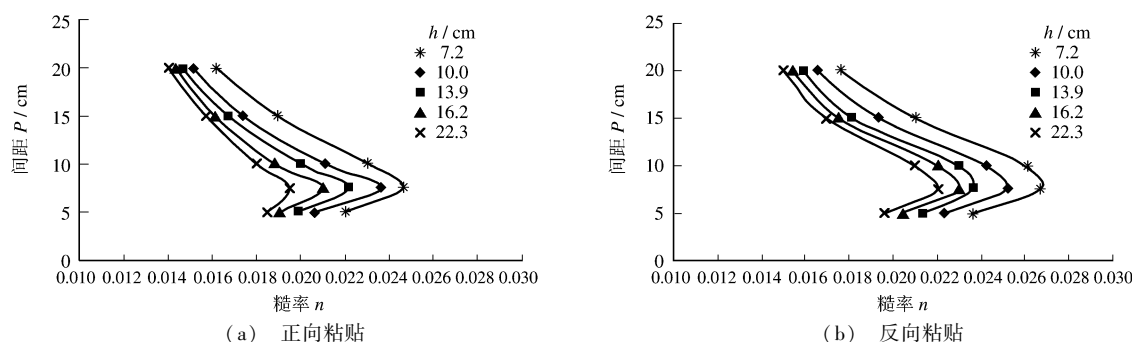


图 4 厚 10mm 三角块正向、反向梅花形粘贴糙率随间距 P 的变化

Fig. 4 Roughness variation in different pasted distance in forward and backward directions

由图 4 可见,当三角块厚度 Δ 和水深 h 一定时,糙率 n 随着间距 P 的减小而增大,且存在一个最大值,然后随着间距 P 的减小而减小. 对于厚度为 10 mm 的三角块,当粘贴间距约为 7.5 cm 时,糙率 n 达到最大值. 卢汉才、唐存本对梅花形石子加糙也有类似试验结果,即当石子粘贴间距为石子等容粒径的 2~3 倍时,加糙糙率 n 达到极大值. 因此,从加糙效果来看,加糙体密度很大时,实际上就好比将床面抬高了一层,加糙体并非越密越好.

2.2 计算式推导

2.2.1 正向粘贴 设河床上有突出的块体,每个块体的迎水面积为 a ,每个块体所占河床床面面积为 F ,块体的体积为 δ ,均匀流水流速度为 V . 根据河床阻力的可加性原理,在 F 面积上河床的总切力应为块体绕流阻力、块体表面摩擦力与河床摩擦力之和. 可用(1)式表示上述关系:

$$\rho g h i_s \left(F - \frac{\delta}{\Delta} \right) + \rho g (h - \Delta) i_s \left(\frac{\delta}{\Delta} \right) = C_d a \frac{\rho V^2}{2} + \rho g h i_f \left(F - \frac{\delta}{\Delta} \right) + \rho g (h - \Delta) i_f' \left(\frac{\delta}{\Delta} \right) \quad (1)$$

式中: ρ 为水的密度; i_s 为水面比降,即单位水体对河床的总切应力; Δ 为块体在河床上的突起高度; h 为水深; i_f' 为块体表面摩擦比降; C_d 为块体的阻力系数; i_f 为床面摩擦比降.

(1)式中自左向右第 1 项表示 $(F - \delta/\Delta)$ 河床面积上河床切应力;第 2 项表示 δ/Δ 块体面积上河床切应力;第 3 项表示块体绕流阻力;第 4 项表示 $(F - \delta/\Delta)$ 河床面积上表面摩擦力;第 5 项表示 δ/Δ 块体面积上表面摩擦力.

近似认为 $i_f' = i_f$, i_s 和 i_f 采用等流速的数值,即

$$i_f = \frac{n_f^2 V^2}{R^{\frac{4}{3}}}, \quad i_s = \frac{n_s^2 V^2}{R^{\frac{4}{3}}} \quad (2)$$

式中: n_f 为加糙前河床表面曼宁糙率系数; n_s 为加糙后总的曼宁糙率系数; R 为水力半径.

将(2)式代入(1)式化简得:

$$C_d = \frac{19.6 \left(1 - \frac{\delta}{Fh}\right) (n_s^2 - n_f^2)}{\frac{a}{F} \left(\frac{R^{\frac{4}{3}}}{h}\right)} \quad (3)$$

如果能确定各种糙体粘贴方式的阻力系数 C_d , 就可通过(3)式求得加糙后床面糙率系数 n_s .

由于篇幅关系, 本文没有列出正向粘贴的阻力系数 C_d 表达式的推导过程, 只给出最终阻力系数 C_d 的表达式(4), 详细推导过程见参考文献[10].

$$C_d = 0.60 \left[-0.92 \left(\frac{P}{10\xi} \right)^2 + 1.67 \left(\frac{P}{10\xi} \right) - 0.27 \right] \left(\frac{\Delta}{\xi} \right)^{-0.83} \left(\frac{h}{\Delta} \right)^{-0.82} \quad (4)$$

式中: P 为块体布置纵向距离; ξ 为块体影响水流的代表尺度, 为等腰三角块底边长.

2.2.2 反 向 粘 贴 与正向粘贴相似, 只给出反向粘贴的阻力系数 C_d 表达式(5), 详细推导过程见参考文献[10].

$$C_d = 0.89 \left[-0.96 \left(\frac{P}{10\xi} \right)^2 + 1.79 \left(\frac{P}{10\xi} \right) - 0.31 \right] \left(\frac{\Delta}{\xi} \right)^{-0.78} \left(\frac{h}{\Delta} \right)^{-0.84} \quad (5)$$

2.3 计算式的验证

首先确定三角块厚度、布置方式和水深, 然后根据(4)、(5)式分别计算阻力系数 C_d , 最后代入(6)式计算加糙糙率

$$n_s = \sqrt{n_f^2 + \frac{aR^{\frac{4}{3}}C_d}{19.6(Fh - \delta)}} \quad (6)$$

式中: n_f 为加糙前河床曼宁糙率系数; n_s 为加糙后曼宁糙率系数; R 为水力半径(cm); h 为水深(cm); F 为单个块体所占的床面面积(cm^2); δ 为单个块体体积(cm^3); a 为单个块体的迎水面面积(cm^2).

三角块正向、反向梅花形粘贴糙率的计算值与实测值的比较分别见图5(a)和(b). 可见, 所有点基本都分布在 45° 线附近, 糙率计算值与实测值偏差在 10% 以内, 表明三角块梅花形正、反向粘贴糙率计算式具有较好的精度.

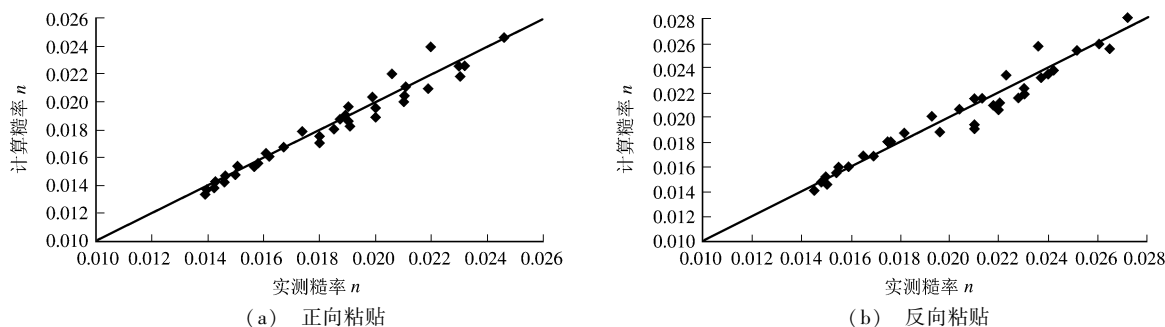


图5 三角块正向、反向梅花形粘贴糙率计算值与实测值比较

Fig. 5 Roughness comparison between computed value and measured value in forward and backward directions

3 三角块梅花形加糙方法在长江河口段模型中的应用

3.1 模型概况

长江河口段模型上起江阴利港, 下迄吴淞口. 模型平面比尺为 1 : 655, 垂直比尺为 1 : 100, 原型河道全

长约175 km,模型全长约 267 m. 该河段主要由福姜沙水道、通州沙水道、白茆沙水道和宝山水道组成. 长江自江阴鹅鼻嘴以下为长江河口段,江面展宽,江中洲滩群生. 该河段内有福姜沙、双涧沙、民主沙、长青沙、通州沙和白茆沙等沙洲,其主要碍航浅滩有福姜沙、通州沙和白茆沙(简称三沙). 模型主要研究河段内碍航水道整治、边滩围垦及沿江防洪等问题.

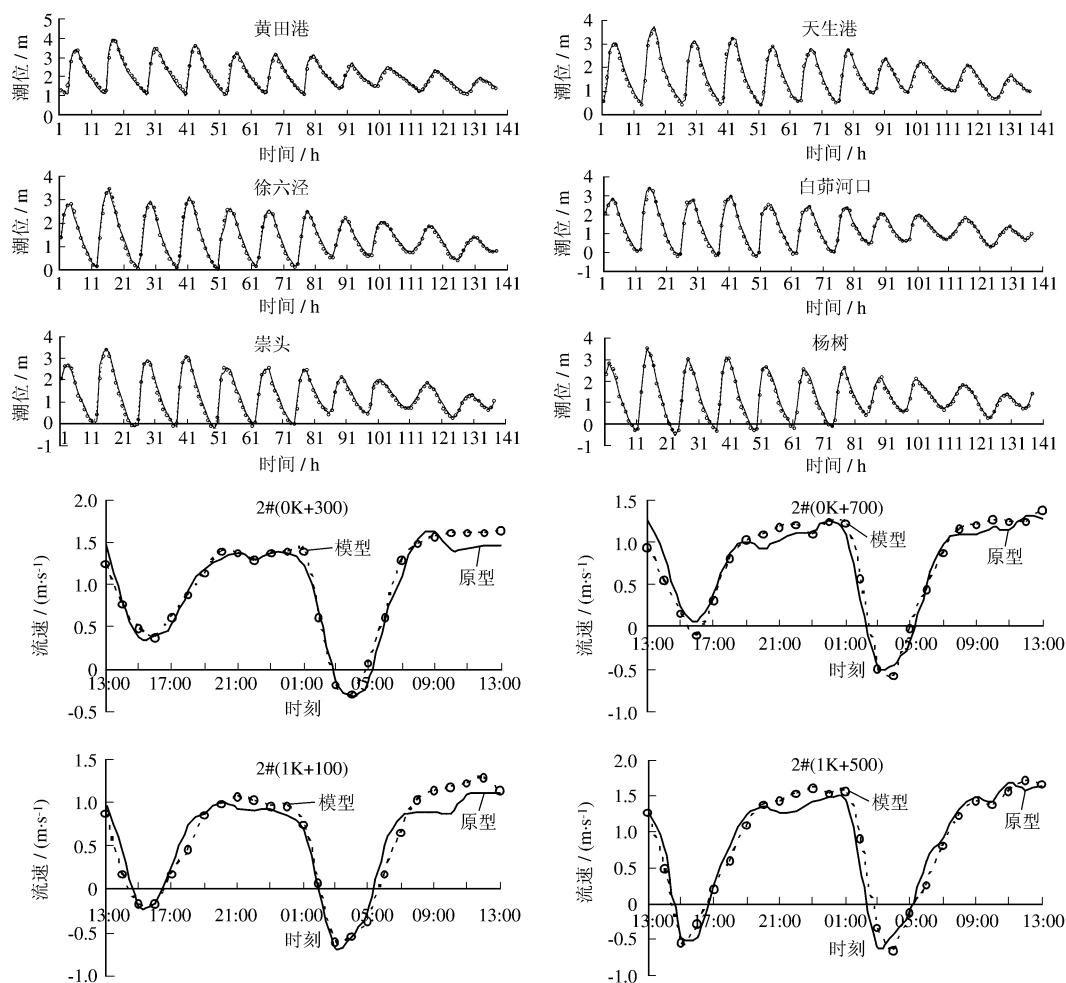
3.2 模型三角块梅花形加糙

由于本模型模拟范围大,不同河段、不同水深处的糙率都不同,且该河段落潮流是塑造河床的主要动力,涨潮糙率一般略大于落潮糙率. 因此,将模型分为3段进行人工加糙,模型上游进口江阴利港至如皋沙群尾部,如皋沙群尾部至徐六泾和徐六泾至吴淞河口段.

根据实测资料^[11,12]以及数模成果^[13],原型3段河道综合糙率均值 n_p 分别为0.020、0.019和0.018. 根据模型糙率比尺计算得到3段河道模型综合糙率均值 n_m 分别为0.024、0.023和0.021. 根据试验成果,模型采用厚度为5、10和15 mm 3种橡皮块进行梅花形加糙. 床面高程 $\nabla-5$ m以上用厚度5 mm的三角块加糙, $\nabla-15$ m与 $\nabla-5$ m之间用厚度10 mm的三角块加糙, $\nabla-15$ m以下用厚度15 mm的三角块加糙. 粘贴间距分别为10 cm×10 cm、10 cm×11 cm和10 cm×13 cm. 在模型验证过程中,再对局部地方糙率进行调整,最终使模型满足阻力相似要求.

3.3 模型验证结果

由于篇幅关系,本文只列出部分水位测站(黄田港、天生港、徐六泾、白茆河口、崇头和杨树,潮位以85国家基面为基准)和福姜沙2#断面流速测点验证成果(见图6). 可见,模型河段通过三角块梅花形加糙后,基本满足阻力相似要求,模型潮位、流速与天然基本一致,模型能较好地复演天然河道水流运动规律.



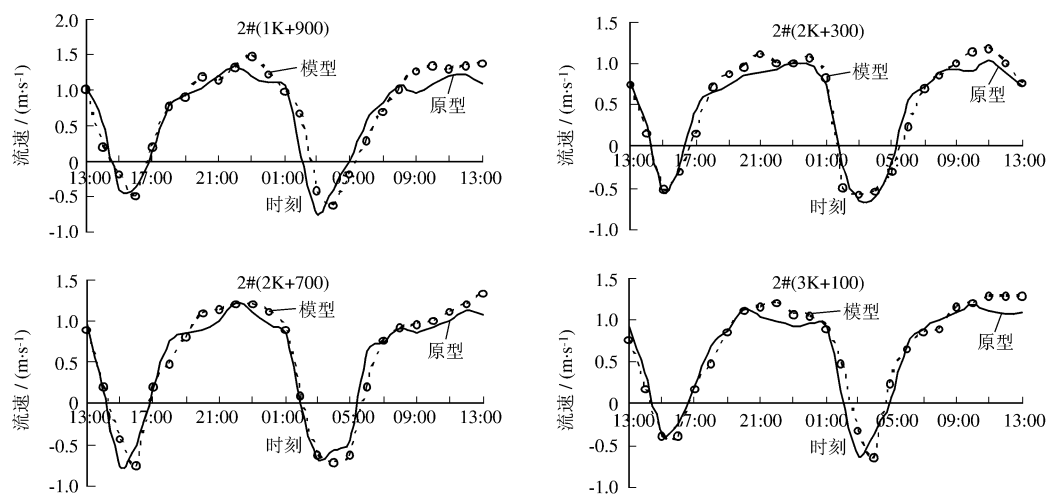


图6 洪季大潮模型潮位和流速过程线验证

Fig. 6 Tidal level and velocity verification during the flood season

4 结 语

(1)在宽水槽中通过均匀流试验研究了三角块梅花形加糙阻力,运用谢才公式计算了各种加糙方式的加糙糙率.基于试验成果,根据河床阻力可加性原理推导了糙率计算式,计算值与实测值偏差在10%以内.

(2)将三角块梅花形加糙研究成果应用于长江河口段模型,模型潮位和流速验证试验表明,模型潮位及流速与原型实测值基本一致,模型能较好地复演天然河道水流运动规律.

参 考 文 献:

- [1] 惠遇甲,王桂仙. 河工模型相似理论[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999:32-42.
- [2] 李昌华,金德春. 河工模型试验[M]. 北京:人民交通出版社,1981:52-70.
- [3] 卢汉才,杜宗伟. 泥沙模型试验经验汇编[G]. 1978:258-264.
- [4] 唐存本. 复合糙率的研究[R]. 天津:天津水运工程研究所,1978.
- [5] 罗肇森,孙梅秀. 几种人工糙率的计算[J]. 水利水运科学研究,1981,(2):42-50.
- [6] 梁 斌,陈先朴. 梅花形十字板加糙的原理与实践[J]. 水动力学研究与进展,2005,20(2):258-262.
- [7] Knight D W. Hydraulic Resistance of Artificial Strip Roughness[J]. *Hyd Div ASCE*, 1979, 105(6):675-690.
- [8] 李浩麟. 潮汐水流垂线流速分布与河床阻力的研究[J]. 水利学报,1992,(11):57-62.
- [9] 陈志昌,黄仁元,胡志峰. 长江口潮汐模型设计和验证[J]. 水运工程,1999,(10):60-66.
- [10] 徐 华. 潮汐河工模型三角块梅花形加糙试验研究及其应用[D]. 南京:南京水利科学研究院,2006.
- [11] 长江委长江水文水资源勘测局. 长江三沙航道原型观测水文测验技术报告(洪季)[R]. 武汉:长江委长江口水文水资源勘测局,2004.
- [12] 长江委长江水文水资源勘测局. 长江三沙航道原型观测水文测验技术报告(枯季)[R]. 武汉:长江委长江口水文水资源勘测局,2005.
- [13] 夏云峰,闻云呈. 福姜沙河段深水航道治理工程二维潮流数值模拟研究[R]. 南京:南京水利科学研究院,2006.