

波流共同作用下细沙粉沙质海岸 复合沿岸输沙率计算

孙林云¹, 吴炳良², 郭天润³

(1. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029; 2. 江苏省交通规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210005; 3. 上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200135)

摘要:应用能量原理建立波浪作用下沿岸输沙率公式时,通常采用波浪的“载沙量”与沿岸流的乘积推导而得. 对于一般的沙质海岸,由于岸滩坡度较陡,波浪破碎带较窄,破波带内潮流流速与破波产生的沿岸流相比较小,常可忽略. 而对于细沙粉沙质海岸,岸滩坡度相对较缓,风暴潮期间,近岸波浪较大,破波水深较深,破波带较宽,近岸潮流流速也较大. 因此,细沙粉沙质海岸风暴潮期间波浪和潮流共同作用下的复合沿岸输沙率计算应当考虑波浪和潮流的共同作用. 在以往波浪作用下沙质海岸沿岸输沙率研究的基础上,通过波浪潮流共同作用下近岸水流特性和沿岸输沙率特性港池试验研究,得出了波流共同作用下复合沿岸输沙率计算公式,据此,将能量输沙原理导出的沿岸输沙率计算公式推广应用到波流共同作用下的复合沿岸输沙率计算,经与模型试验结果和现场实测资料对比,吻合良好. 该公式可以有条件地推广应用到细沙粉沙质海岸波浪潮流共同作用下复合沿岸输沙率计算.

关键词:细沙粉沙质海岸; 波流共同作用; 复合沿岸输沙率; 能量原理; 试验研究

中图分类号: TV148

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2011)04-0131-07

近30年来,随着我国实行对外开放政策,传统意义上适合修建各类涉水工程的优良海岸资源已不能满足日益增长的发展需求. 于是介于沙质和淤泥质之间的粉沙质海岸资源被开发利用,典型的工程有位于渤海的京唐港、黄骅港和南海的广东汕头港等. 这类工程所处海岸环境的动力条件为波浪潮流共同作用、岸坡较缓、破波带宽广、泥沙运动规律十分复杂. 例如,2003年10月中旬渤海发生了一次强风暴潮,由于持续大风作用产生约50年一遇的大浪及风暴增水,京唐港和黄骅港开挖的外航道几乎淤平,严重影响了两港的正常运行,经济损失惨重. 经过多年来的现场观测、理论分析和试验研究,对粉沙质海岸的动力特征和泥沙运动规律有了一定的认识,研究^[1]表明,粉沙质海岸根据其动力特征、岸滩坡度、泥沙粒径及其运动规律的不同,又可分为细沙粉沙质海岸和淤泥粉沙质海岸. 本文重点介绍在以往沙质海岸沿岸输沙率问题研究的基础上,结合波浪水流共同作用下近岸水流特性和沿岸输沙率特性港池试验,得出适用于细沙粉沙质海岸波流共同作用下复合沿岸输沙率计算公式,为进一步分析研究细沙粉沙质海岸近岸泥沙运动规律和这类海岸涉水工程防淤减淤措施提供依据.

1 能量输沙原理沿岸输沙率公式

1.1 沿岸水流研究现状

平直的沙质海岸坡度一般较陡,斜向入射波在近岸区发生破波,进而产生破波沿岸流和沿岸输沙. Johnson 首次指出沿岸流是波浪运动产生的. M. S. Longuet-Higgins^[2]最早将波浪辐射应力理论应用到沿岸流

收稿日期: 2011-10-10

作者简介: 孙林云(1959-),男,上海人,教授级高级工程师,主要从事河口海岸工程泥沙问题及河口综合利用规划研究.

E-mail: lysun@nhri.cn

研究中,得出了沿岸流分布解析模式.同年,P. D. Komar 等^[3]在研究沿岸输沙率时提出了有重要意义的平均沿岸流,计算公式如下式:

$$V_l = 2.7 u_{mb} \cos \alpha_b \sin \alpha_b \quad (1)$$

随后许多学者分别通过物理模型试验和数学模型计算对 Longuet-Higgins 的沿岸流模式进行了验证.与此同时,学者们开始关注波浪动量流和水流动量流的相互作用与转化关系. Jonsson 将波浪作用通量的守恒方程应用于波流共同作用问题. K. F. Lambrakos^[4]将波频谱引入到波流作用相互问题中,认为波频谱随着潮流流速的变化和波流夹角的大小而发生改变.李玉成^[5]对波浪与稳定流相互作用的二元流条件下的流速场进行了研究.但是,此类研究的岸滩坡度基本上都是均匀的,物理模型试验均为定床,对坡度较缓的细沙粉沙质海岸沿岸水流特性研究鲜有报导.

1.2 能量输沙原理沿岸输沙计算公式研究进展

沿岸输沙问题的研究,可大体分为波能流法(或能量法),河流输沙类比法和纯经验法等.波能流法的基本假定是破波带内总的沿岸输沙与波浪所具有的能量的沿岸分量成正比.由于波能流法沿岸输沙率公式与之后根据能量输沙原理获得的输沙率公式结构相同,因而前者重新被赋予了理论意义,并且在工程应用上优于其他方法,下文着重介绍该方法.

波能流法最早是由 U. S. Grant^[6]提出,其后,国外许多学者开展了大量的现场实测和室内研究,确定了输沙率系数,最终被美国陆军工程兵团《海岸防护手册》采用,形成了著名的 CERC 公式如下:

$$Q = \frac{K}{(\rho_s - \rho)g} (EC_g)_b \cos \alpha_b \sin \alpha_b \quad (2)$$

D. L. Inman 等把 R. A. Bagnold^[7]对于风吹沙和河流输沙能量原理引入了破波带沿岸输沙,认为破波与沿岸流的共同作用产生了近岸带的泥沙输移,波浪掀起泥沙并处于运动状态,而沿岸流则使悬浮的泥沙产生了净输移,导出了“波浪掀沙,沿岸水流输沙”的能量法沿岸输沙率计算公式如下式:

$$Q = \frac{K'}{(\rho_s - \rho)g} (EC_g)_b \frac{V_l}{u_{mb}} \quad (3)$$

当上式中平均沿岸流 $\bar{V}_l$ 采用由 Komar 和 Inman 提出的式(1)时,式(2)与式(3)相同,而式(1)与 Longuet-Higgins 根据辐射应力理论导得的沿岸流公式基本一致,于是波能流法 CERC 公式被重新赋予了理论意义.

除 CERC 公式之外,还有很多学者对沿岸输沙率问题进行过研究,并根据能量输沙原理推导出了不同的计算公式.值得一提的是 J. W. Kamphuis^[8]进行的三维水工规则波与不规则波模型试验.试验中考虑了深水波要素、破波波高、破波波向角、沿岸流流速分布以及推移质和悬移质的输移情况.根据试验数据,以能量输沙理论为基础,通过无量纲分析,将波陡、岸滩坡度、破波角、泥沙粒径等因子组合起来得到沿岸输沙计算公式.20 世纪 90 年代初,孙林云等^[9-10]通过量纲分析和显著性参数分析,结合我国援建的大西洋东岸西非毛里塔尼亚友谊港附近典型沙质海岸近岸波浪动力、沿岸流、悬移质含沙量及岸滩剖面等测量资料,根据能量输沙原理推导出考虑波浪破碎类型及泥沙粒径等参数的输沙率计算公式如下,式中平均沿岸流计算由式(5)给定.

$$Q = \frac{0.6 \times 10^{-2}}{(\rho_s - \rho)g} I_r^{1/2} \frac{V_l}{\omega} (EC_g)_b \quad (4)$$

$$V_l = 6.73 I_r^{7/8} u_{mb} \cos \alpha_b \sin \alpha_b \quad (5)$$

式(4)和(5)与 CERC 公式相比,相当于 CERC 公式中 $K = 4.0 \times 10^{-2} I_r^{3/8} \frac{u_{mb}}{\omega}$,这表明沿岸输沙率系数与岸滩条件、波浪能量大小等因素有关^[11-12].式(4)计算值与友谊港海岸实测值比较见图 1,图中的输沙率用浮重度表示($I_r = (\rho_s - \rho)gaQ$, a 为天然沙滩孔隙率,一般取为 0.4).

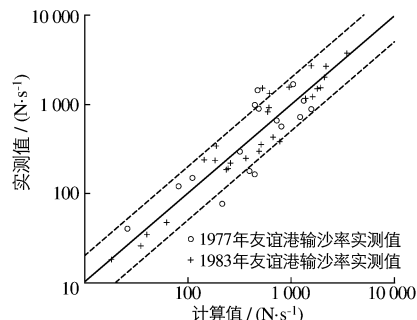


图 1 沿岸输沙率按计算值与实测值比较

Fig. 1 Comparison between formula (4) and field data

上述式(1)~(5)中, $I_r = \frac{\tan\beta}{(H_b/L_0)^{0.5}}$ 为波浪破碎因子(即伊利巴伦数); $\tan\beta$ 为岸滩坡度; H_b 为破波波高; L_0 为深水波长; ω 为海滩泥沙中径沉速; $u_{mb} = \sqrt{2E_b/\rho h_b}$ 为破波时底部水质点最大轨迹速度; h_b 为破波水深; a_b 为破波波向角; ρ, ρ_s 分别为水和泥沙的密度; g 为重力加速度; C_g 为波群速度; E 为波浪能量, 下标 b 代表破波指标; K, K' 为常系数。

2 波流共同作用下近岸破波带水流特性和输沙率试验

波浪从深水传到近岸的过程中, 由于水深的变化, 地形的影响及其内部能量的耗散, 会发生浅水变形直至波浪破碎, 从而产生沿岸方向的水体运动即为波生沿岸流。沙质海岸岸坡较陡, 约为 $1/20 \sim 1/50$, 破波带潮流较弱, 常可略去。而细沙粉沙质海岸, 岸滩坡度相对较缓, 约为 $1/70 \sim 1/400$, 尤其是风暴潮期间, 近岸波浪较大, 破波水深较深, 破波带较宽, 近岸潮流流速也较大。因此, 细沙粉沙质波流共同作用下的复合沿岸输沙率计算应当考虑波浪和潮流的共同作用。下文主要介绍波流共同作用下近岸破波带水流特性和输沙率动床试验结果。

2.1 模型场地布置及试验方法

考虑到定床和动床床面阻力不同, 试验选取 $1/30$ 单一坡度和 $1/120 \sim 1/220$ 复合坡度 2 种地形进行动床水流及泥沙试验。模型沙采用经特殊加工的精煤粉, 颗粒密度为 1.36 g/cm^3 , 单一坡度选取中值粒径 0.24 mm , 铺设范围为沿岸 10 m , 离岸 6.4 m , 厚度 0.15 m ; 复合坡度选取中值粒径 0.13 mm , 铺设范围为沿岸 14 m , 离岸 16 m , 厚度 0.15 m , 离岸 16 m 范围坡度为 $1/120$, 其余部分坡度为 $1/220$ 。模型试验布置见图 2。

动床试验中, 在试验区上游按照地形冲淤平衡要求投放沙量, 并在试验区下游进行铺沙, 试验时间视动力要素大小及泥沙冲淤平衡周期而定, 一般控制在 $10 \sim 30 \text{ min}$ 内, 并从小波高小流速向大波高大流速逐渐递增, 试验实况见图 3。

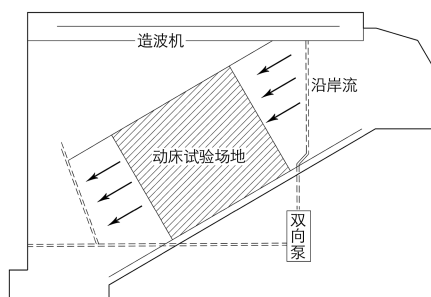


图2 $1/120 \sim 1/220$ 复合坡度模型布置

Fig.2 Model layout of combined slopes of $1:120$ and $1:220$

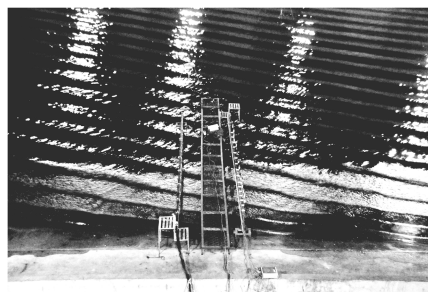


图3 模型动床试验实况

Fig.3 Physical model test of movable bed

2.2 试验主要参数及量测方法

模型通过调节循环双向泵转速来调整外加沿岸水流强弱, 并通过改变造波机频率及离心距, 间接调整试验外海波浪的周期和波高。共选取 3 种双向泵转速 ($0, 80$ 和 130 r/min)、3 种波周期 ($0.6, 0.8$ 和 1.0 s)、7 种外海波高 ($1.3, 1.7, 2.0, 2.8, 3.0, 4.5$ 和 6.0 cm) 结合 2 种坡度分别进行动床水流泥沙试验, 共组合 78 组次试验, 其中 $1/30$ 单一坡度组次 33 组, $1/120 \sim 1/220$ 复合坡度组次 45 组。

试验波高及波周期统一采用 dj800 波高采集系统进行测量; 波向角采用量角器测量; 沿岸流速采用旋桨式流速流向仪测量; 含沙量采用接触式光电式浊度仪测量并用比重瓶抽样分析校核; 泥沙粒径采用筛分法测量; 试验地形采用退水围等深线法和断面地形测量相互校核, 分别用地形法结合加沙量和捕沙量以及水文法确定试验沿岸输沙率。

3 波流共同作用下复合沿岸输沙率计算公式

3.1 波流共同作用下沿岸水流特性试验结果分析

3.1.1 单纯波浪作用下近岸波高和沿岸水流特性 在 2 种岸滩坡度条件下,波高在垂直海岸方向上的分布形态基本一致(见图 4). 在水深较深的离岸水域,地形平坦,波浪在传播过程中受局部地形变化较小,波高趋于定值;当波浪进入近岸水域,随水深逐步减小而发生浅水变形,波高增大,当波高与水深的比值达到某一临界值,波浪发生破碎,一部分波能参与水体紊动耗散,波高迅速减小. 在相同坡度条件下,破波带宽度随深水入射波高的增加而相应变宽,而在相同深水入射波高条件下,破波带宽度随岸滩坡度变缓而增大.

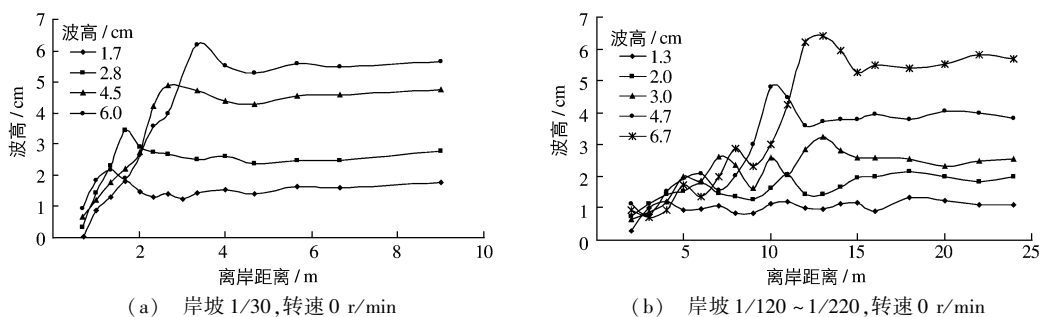


图 4 单纯波浪条件下两种岸滩坡度近岸波高沿程变化

Fig. 4 Cross-shore wave heights of two shore slopes without tide

图 5 为单纯波浪条件下 2 种岸滩坡度不同入射波近岸破波带沿岸流分布,理论分析和实测结果均表明,波浪作用下沿岸流流速分布在剖面上都存在一个峰值,且在其两侧呈现单调递减趋势. 随着破波波高变大,最大流速点逐渐向离岸方向偏移,过流断面面积也随之增大. 从图还可以看出,岸坡较陡的单一坡度条件下,沿岸流峰值较大,但破波带分布较窄;而在坡度较缓的复合坡度条件下,沿岸流峰值明显减小,但破波带分布较宽.

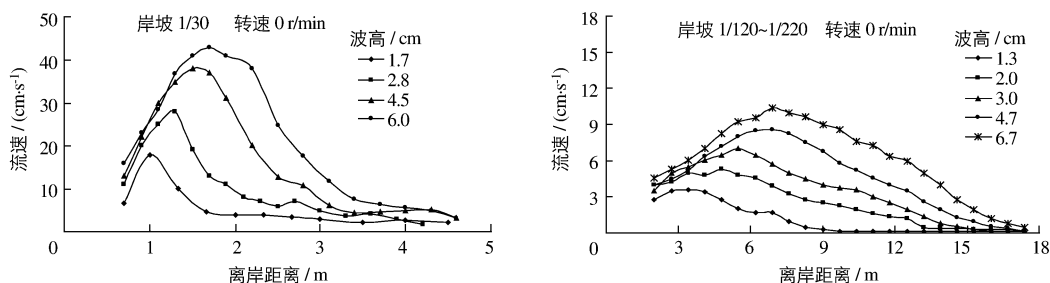


图 5 单纯波浪条件下两种岸滩坡度不同入射波近岸破波带沿岸流分布

Fig. 5 Cross-shore distributions of alongshore current rate of different wave incident angles under two shore slopes without tide

如前所述,作者在研究典型沙质海岸毛里塔尼亚友谊港时,曾讨论了破波带平均沿岸流计算公式,当引入表征破波类型参数伊利巴伦数后,破波带平均沿岸流计算值与实测值吻合更好. 根据本次试验结果分析,岸滩坡度对沿岸流的大小及分布影响明显,为此,破波带平均沿岸流计算公式需要考虑岸滩坡度对沿岸流速的影响,引入岸滩坡度因子 m ,将前文式(5)修正为:

$$V_l = 1.59m^{-0.424}I_r^{7/8}u_{mb}\sin\alpha_b\cos\alpha_b \quad (6)$$

图 6 为单纯波浪作用下,2 种坡度破波带沿岸流平均流速按式(6)计算值与模型试验结果比较,由图可见,两者吻合较好.

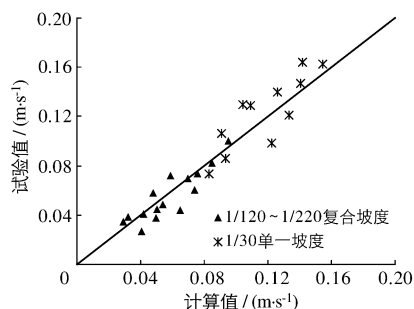


图 6 单纯波浪作用下平均沿岸流计算值与试验值比较

Fig. 6 Comparison between the calculated and measured values of average alongshore current without tide

3.1.2 波流共同作用下近岸波高和复合沿岸流特性 图7为波流共同作用下,2种坡度不同入射波近岸波高的沿程变化.由图可知,由于沿岸叠加水流,水流运动对波浪传播产生部分影响,破波带内波高沿程规律与单纯波浪作用下基本一致,但破波波高存在略有减小的趋势.

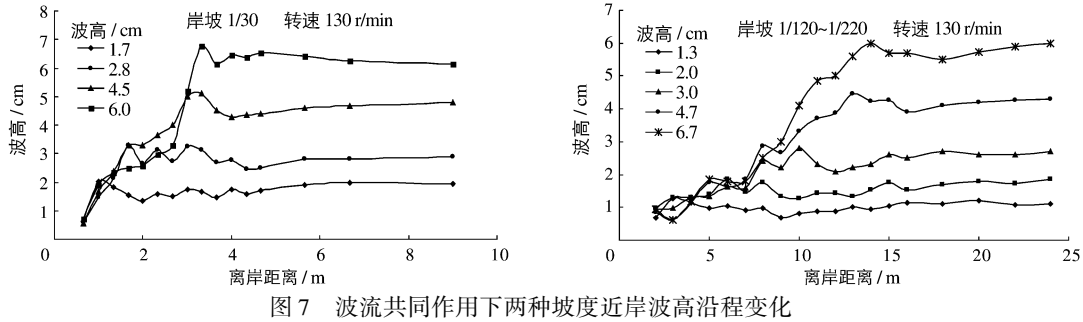


图7 Cross-shore distributions of wave height under two shore slopes with tide presence

图8为波流共同作用下,2种坡度不同入射波条件下,近岸破波带沿岸流沿程变化.由图可见,由于叠加了平行于海岸的沿岸水流,对于岸坡较缓的复合坡度而言,破波区内波生沿岸流和沿岸水流叠加形成复合沿岸流,其流速值明显比单纯波浪作用下波生沿岸流要大.而对于岸坡较陡的单一坡度而言,由于破波区较窄,叠加的沿岸水流对波生沿岸流影响较小.

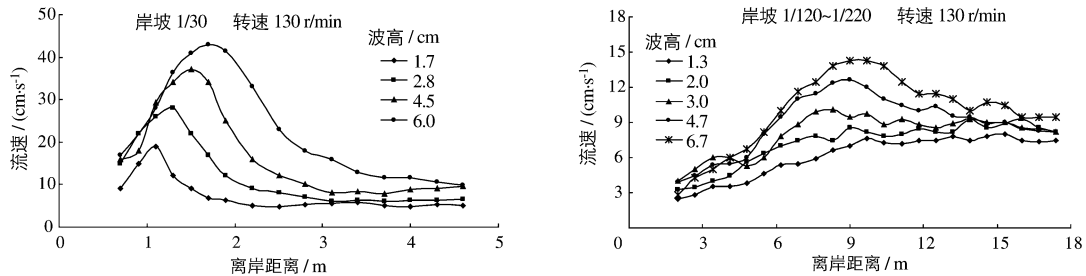


图8 波流共同作用下两种坡度不同入射波近岸破波带复合沿岸流分布
Fig. 8 Cross-shore distributions of composite alongshore current of different wave incident angles under two shore slopes with tide presence

根据模型试验观察和测量资料进一步分析可知,对于岸坡相对较缓的海岸条件,破波产生的沿岸流与平行海岸的叠加水流同向共线,可进行叠加.考虑到波流相互作用中底质摩阻和水体紊动对流速产生的影响,根据前人研究和能量守恒原理可得复合沿岸流流速 V_m 存在如下关系:

$$V_l^2 + V_c^2 = V_m^2 + h_f \quad (7)$$

式中: V_l 为考虑坡度因子 m 影响的平均沿岸流流速; V_c 为叠加的沿岸水流流速; h_f 为波流相互作用中的能量耗散项,且在特定底质条件下仅与2种水流叠加时的相互作用状况有关,令 $h_f = kV_lV_c$ (k 为常数项),代入上式得到:

$$V_m = \sqrt{V_l^2 + V_c^2 - kV_lV_c} \quad (8)$$

根据本次动床试验资料分析,采用对比拟合方法,当 k 取0.3时能较好地满足两种岸滩坡度条件下复合沿岸流速计算关系,拟合结果见图9.

3.2 波流共同作用下复合沿岸输沙率计算公式

3.2.1 复合沿岸输沙率计算公式 根据前文介绍的能量输

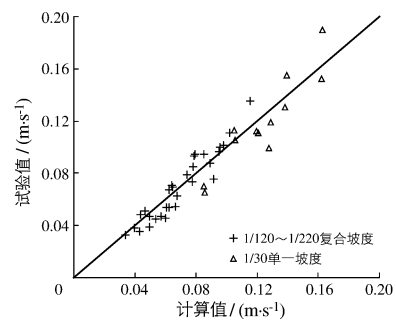


图9 复合沿岸流计算值与试验值的关系对比
Fig. 9 Comparison between the calculated and measured values of composite alongshore current velocities

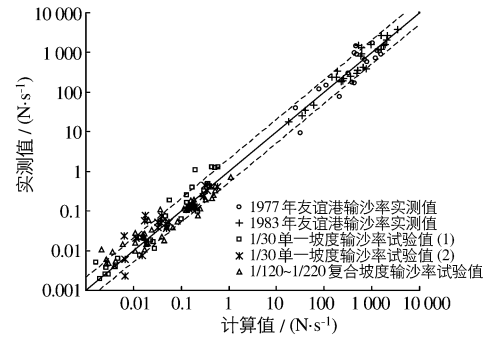
沙原理得出的沿岸输沙率计算公式(4),将式中单纯波浪作用下平均沿岸流流速 V_l 用波流共同作用下复合沿岸流流速 V_m 替代,可得波流共同作用下复合沿岸输沙率公式如下:

$$Q = \frac{0.6 \times 10^{-2}}{(\rho_s - \rho)} I_r^{-1/2} (EC_g)_b \frac{V_m}{\omega} \quad (9)$$

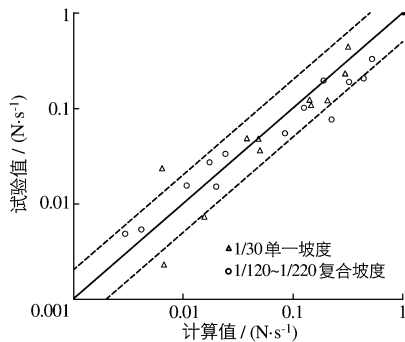
将 V_m 用式(8)、 V_l 用式(6)代入式(9)可得:

$$Q = \frac{0.954 \times 10^{-2}}{(\rho_s - \rho)g} m^{-0.424} I_r^{3/8} (EC_g)_b \frac{u_{mb}}{\omega} \cos \alpha_b \sin \alpha_b \quad (10)$$

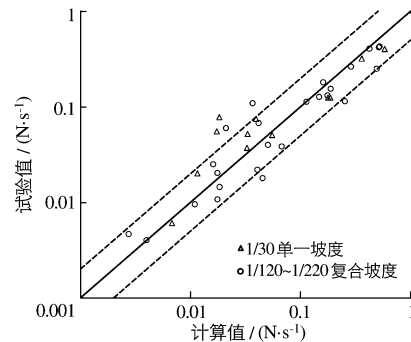
3.2.2 复合沿岸输沙率公式检验 将复合沿岸输沙率公式(10)的计算值,分别与本次试验中单纯波浪作用条件下沿岸输沙率和波流共同作用条件下复合沿岸输沙率试验值以及结合毛里塔尼亚友谊港实测资料进行比较,结果见图 10(图中 1/30 单一坡度输沙率试验值分为两部分,试验值(1)为作者 3 试验数据,试验值(2)为本次试验得到测量值)。由图可见,式(10)不仅与试验结果吻合较好,而且与现场实测值也保持良好的统一关系,表明公式中考虑的输沙影响因素是合适的。



(a) 模型试验值和原型实测值比较



(b) 单纯波浪作用下



(c) 波流共同作用下

图 10 波浪作用下式(10)计算值和试验值比较

Fig. 10 Comparison between the calculated and measured values of Eq. (10)

4 结 语

根据 2 种典型岸坡波流共同作用下复合沿岸流模型试验结果,对以往的沿岸流计算公式进行修正引入岸坡因子,并根据试验资料提出了波生沿岸流与沿岸水流叠加的复合沿岸流计算公式,据此对能量输沙原理导得的沿岸输沙率计算公式推广到波流共同作用下复合沿岸输沙率计算,经与模型试验值和现场实测值对比吻合较好,该公式可以有条件地应用到细沙粉沙质海岸波浪潮流共同作用下复合沿岸输沙率计算。

参 考 文 献:

- [1] 孙林云, 孙波, 刘建军, 等. 京唐港粉沙质海岸风暴潮淤积及整治工程措施物理模型试验[J]. 中国港湾建设, 2010(增刊 1): 28-31. (SUN Lin-yun, SUN Bo, LIU Jian-jun, et al. Physical model tests on sudden siltation caused by storm and mitigation measures for fine sand coast in Jingtang Port [J]. China Harbor Engineering, 2010(Suppl 1): 28-31. (in Chinese))
- [2] LONGUET-HIGGINS M S. Longshore currents generated by obliquely sea waves[J]. Journal of Geophysical Research, 1970, 75 (33): 6778-6801.
- [3] KOMAR P D, INMAN D L. Longshore Sand Transport on Beaches[J]. Journal of Geophysical Research, 1970, 75(30): 5914-5927.

- [4] LAMBRAKOS K F. Wave2 current interaction effects on water velocity and surface wave spectra[J]. J Geophys Res, 1981, 86: 10955-10960.
- [5] 李玉成. 波浪与水流共同作用下的流速场[J]. 海洋工程, 1983(4): 25-29. (LI Yu-cheng. Velocity field for interacting waves and currents[J]. The Ocean Engineering, 1983(4): 25-29. (in Chinese))
- [6] GRANT U S. Waves as a transporting agent[J]. American Journal of Science, 1943, 241: 117-123.
- [7] INMAN D L, BAGNOLD R A. Beach and nearshore processes- Part 2, Littoral processes[M]. New York: Interscience Wiley, 1943:529-553.
- [8] KAMPHUIS J W. Alongshore sediment transport rate[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1991, 117(6): 624-640.
- [9] 孙林云. 沙质海岸破波带沿岸输沙率问题的研究[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 1992. (SUN Lin-yun. Study on alongshore sediment transport rate in breaking zone of sandy coast[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1992. (in Chinese))
- [10] 郭天润. 波浪作用下沙质海岸的沿岸输沙研究[D]. 南京: 河海大学, 2009. (GUO Tian-run. Study on alongshore sediment transport of sandy coast under waves[D]. Nanjing: Hohai University, 2009. (in Chinese))
- [11] 吴炳良. 波流共同作用下沿岸输沙率研究[D]. 南京: 河海大学, 2010. (WU Bin-liang. Study on alongshore sediment transport rate under wave-current interactions[D]. Nanjing: Hohai University, 2010. (in Chinese))
- [12] SWART D H. Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles[M]. Delft: Delft Hydr Lab Publication, 1974.

Calculation of composite alongshore sediment transport rate under wave-current interaction on the sandy-silty coast

SUN Lin-yun¹, WU Bing-liang², GUO Tian-run³

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Jiangsu Provincial Communication Planning and Design Institute Co. Ltd., Nanjing 210005, China; 3. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co. Ltd., Shanghai 200135, China)

Abstract: Alongshore sediment transport rate is usually produced by sediment carrying capacity of waves and alongshore current velocities based on energy principle. For general sandy coast with steep slope and narrow wave breaking zone, tidal current in the breaking zone is often ignored since it is much smaller than alongshore current. On the sandy-silty coast, which has gentle slopes, nearshore wave height and breaking depth are large and make relative wide breaking zone during storm surge, while nearshore tidal currents are strong as well. Therefore, calculation of sediment transport rate due to storm surge should consider the combined effects of wave and tidal current along such coast. A formula of composite alongshore sediment transport rate is derived according to physical model of alongshore current and sediment transport. As a result, the general formula based on energy principle is extended to the calculation of composite alongshore sediment transport with wave-current interaction. The new formula is in good agreement with the results of physical model tests and field observation data. The formula can be conditionally applied to calculating composite alongshore sediment transport rate on the sandy-silty coasts.

Key words: sandy-silty coast; wave-current interaction; composite alongshore sediment transport; energy principle; physical model test