

破碎波作用下淤泥含沙量分布试验研究

高祥宇, 高正荣, 窦希萍

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 淤泥质海岸是我国海岸重要组成部分,其泥沙运动主要是“波浪掀沙,潮流输沙”,在大风天破碎波作用下,水体含沙量剧增,对港口航道泥沙回淤会产生严重影响。以往研究沙和粉砂在破碎波作用下含沙量分布特征的较多。本次试验采用自来水和徐圩航道试挖槽内原状泥调配得到的试验淤泥,通过室内1:200缓坡长水槽试验,分析研究崩破波作用下淤泥密度分别为1.35、1.40和1.45 kg/L的水体含沙量分布特征及掀沙机理。分析研究结果表明:破碎波掀沙能力与床面淤泥密度有较强的非线性关系。淤泥密度小于1.45 kg/L时,在破波点之前,底部就开始形成高含沙区,在破波点附近达到最大,在破波点后一定距离,水体明显出现泥沙分层现象。底部含沙量较大时,破碎波作用下淤泥与粉砂含沙量垂线分布特征相似都不均匀。

关键词: 淤泥质海岸;含沙量分布;破碎波;淤泥密度

中图分类号: TV148.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2014)04-0038-06

淤泥质海岸是我国大陆海岸的重要组成部分,长度超过4 000 km,约占大陆海岸的22%^[1]。淤泥质海岸主要由极细的泥沙颗粒(粒径小于0.05 mm)组成。此类海岸岸线较平直,海滩宽广、岸坡极缓,一般约为1/2 000~1/500,位于高潮位与低潮位之间的潮间带滩地宽广^[2]。在淤泥质海岸建港时,深水航道和泊位都是在大范围浅滩上开挖而成的。海岸的泥沙运动以悬移质输送为主,潮流和波浪是驱使泥沙运动的主要动力,故而呈现出“波浪掀沙、潮流输沙”的规律。通常天气条件下,海域含沙量较低,但大风浪期间,波浪破碎会对床面泥沙产生强烈扰动,造成水体高含沙量,极易导致航道和泊位区的泥沙骤淤。以往试验研究破碎波作用下含沙量分布多数是针对沙和粉砂^[3-11],研究发现破碎波作用下水体含沙量较非破波作用的明显增大,水体有分层现象,进而提出了一些泥沙浓度垂线分布公式。但对于破波作用下淤泥含沙量分布研究较少。淤泥与沙、粉砂特性有显著的区别,沙和粉砂的研究成果并不能适应淤泥研究。因此,研究淤泥在破碎波作用下含沙量分布特征不仅能丰富海岸泥沙运动规律的认识,且对于淤泥质海岸港口航道的设计、建设和维护均具有重要意义。

1 水槽试验

1.1 试验设备

试验在南京水利科学研究院(简称“南科院”)波浪水槽中进行,水槽尺寸为175 m×1.2 m×1.6 m。试验地形为缓斜坡,距离造波板30 m处开始砌斜坡,前10 m斜坡坡度为3:200,后40 m斜坡坡度为1:200。在1:200缓斜坡前5 m处预留长25 m、深10 cm淤泥槽。

波高采集采用南科院自行研制的CBY-II型波高仪系统,试验布置了10根波高传感器,其中1根传感

收稿日期:2014-01-23

基金项目:国家高新技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA112509);交通运输部建设科技资助项目(2012-329-A06-040);南京水利科学研究院基本科研业务费专项资金资助(重点项目)(Y209005)

作者简介:高祥宇(1975-),男,山西临县人,高级工程师,主要从事水动力学及泥沙运动模拟研究。

E-mail: xygao@nhri.cn

器布置于平底水槽中造波板前 25 m 处,确定入射波高。虹吸采沙装置收集含沙水体,虹吸管为内径 5 mm 的紫铜管。根据波浪破碎预备试验的结果,分别在波浪破碎处及其前、后布置了 3 条采沙和测流垂线,即垂线(S2,V2)位于波浪破碎核心区,垂线(S1,V1)和(S3,V3)分别在垂线(S2,V2)前后各 3 m 处。垂线方向上距离底部 1,5,10 和 20 cm 分别布置 4 根采沙管,管口与波浪方向垂直。图 1 为斜坡及测点布置示意图。

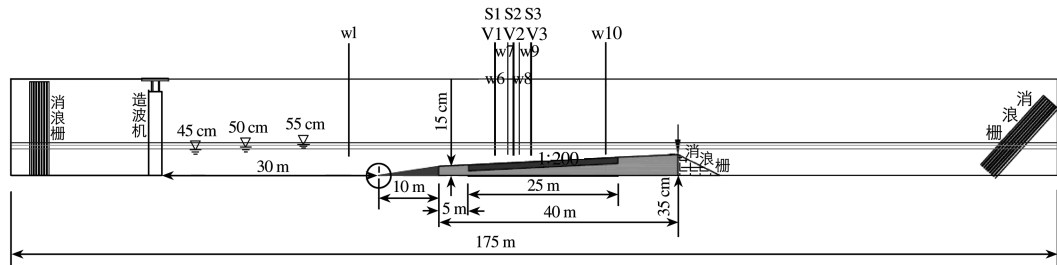


图 1 试验水槽内斜坡及测点布置

Fig. 1 Experimental slope and measuring points

1.2 试验过程

试验输入波采用规则波,水深分别为 45,50 和 55 cm。破碎波类型根据 Battjes 引入的无因次参量 $\xi = \tan\beta/(H/L_0)^{1/2}$ 判断,本次破碎波试验海侧参量范围为 0.021 ~ 0.031 (<0.5),为崩破波^[12]。

试验采用连云港徐圩港航道试挖槽内的淤泥。原状淤泥密度为 1.65 ~ 1.82 kg/L,泥沙中值粒径 $d_{50} = 0.007$ mm。考虑到天津新港和连云港淤泥质海岸浅滩表层取样的密度均在 1.35 ~ 1.40 kg/L,本次试验分别采用 1.35,1.40 和 1.45 kg/L 共 3 种,通过淡水和原状泥调配得到。由于原状淤泥黏性度高,采用大功率电机搅拌器搅拌,反复调配并搅匀后放入沉泥桶中;试验时再次搅动使淤泥密度满足试验要求,然后铺入斜坡预留槽中,人工抹平。试验时缓慢放水,确保泥槽中的淤泥不受水流的影响。

含沙水体采用同步采集的方法,具体采集时间为破碎波开始起 1,3 和 6 min,随后再间隔 3 min 采集 1 次(1,3,6,9,12,15,……,依次下去,直至每一组次试验结束),每次采集时间长度为 10 s。通过对含沙水体进行过滤、烘干、称重最后得到含沙量。本次试验共进行了 16 组试验,具体试验组次见表 1。

表 1 破碎波作用下淤泥质含沙量分布试验组次

Tab. 1 Experimental sets of sediment concentration distribution under breaking waves action

组次	泥沙密度/ (kg·L ⁻¹)	水深/cm	输入周期/ s	输入波高/ cm	组次	泥沙密度/ (kg·L ⁻¹)	水深/cm	输入周期/ s	输入波高/ cm
1	1.35	45	1.6	14.27	9	1.40	50	1.4	17.56
2			1.4	17.56	10			1.6	18.12
3		50	1.6	18.12	11			1.8	16.17
4			1.8	16.17	12		55	1.4	20.63
5		55	1.6	18.97	13			1.6	18.97
6	1.40	45	1.4	13.75	14	1.45	45		14.27
7			1.6	14.27	15		50	1.6	18.12
8		50	1.4	16.56	16		55		18.97

2 试验现象

在破碎波作用下,随着波动水质点的往复运动淤泥面各处呈“冒烟”状,使得整个床面像云雾覆盖一样,且向上扩散,很快在床面上形成浑水层。含沙量由表层至底层逐步增大,床面以上约 4 cm 范围内含沙量较大,底部存在高浓度含沙水层且浓度增加很快,而上部水体含沙量的增加则相对缓慢,破碎波作用后,泥面不

会形成沙波形态。当对淤泥密度为 1.35 kg/L 的泥样进行试验时,破碎波作用时间较短,水体浑浊度很大,破碎点附近大量淤泥开始向波浪传播方向推移,波高衰减很快,波浪破碎点前移。淤泥密度 1.40 kg/L 时,含沙量和波高的衰减都小于淤泥密度为 1.35 kg/L 的情况。这两种淤泥密度的泥面在破波点位置有冲刷坑形成。淤泥密度为 1.45 kg/L 时,水体浑浊度最小,波高衰减不明显,床面泥面光滑。试验发现随着波浪作用时间的增加,水体浑浊度先增大后减小。

在同一水深条件下,输入波浪周期相同,输入波高大引起的水体含沙量也大,含沙量沿程分布与破波位置有关。试验观测到,在破波点之前,底部就开始形成高含沙区,在破波点附近达到最大,在破波点后一定距离,随着波高的减小,水体明显出现泥沙分层现象。

3 试验结果分析

第 2、6 和 16 组含沙量分布的试验结果见图 2。波浪破碎前后都显示底部含沙量大,在距离床面 5 cm 以上的水体中,含沙量梯度变化较小。泥沙密度为 1.45 kg/L 时,上下水体含沙量基本均匀。

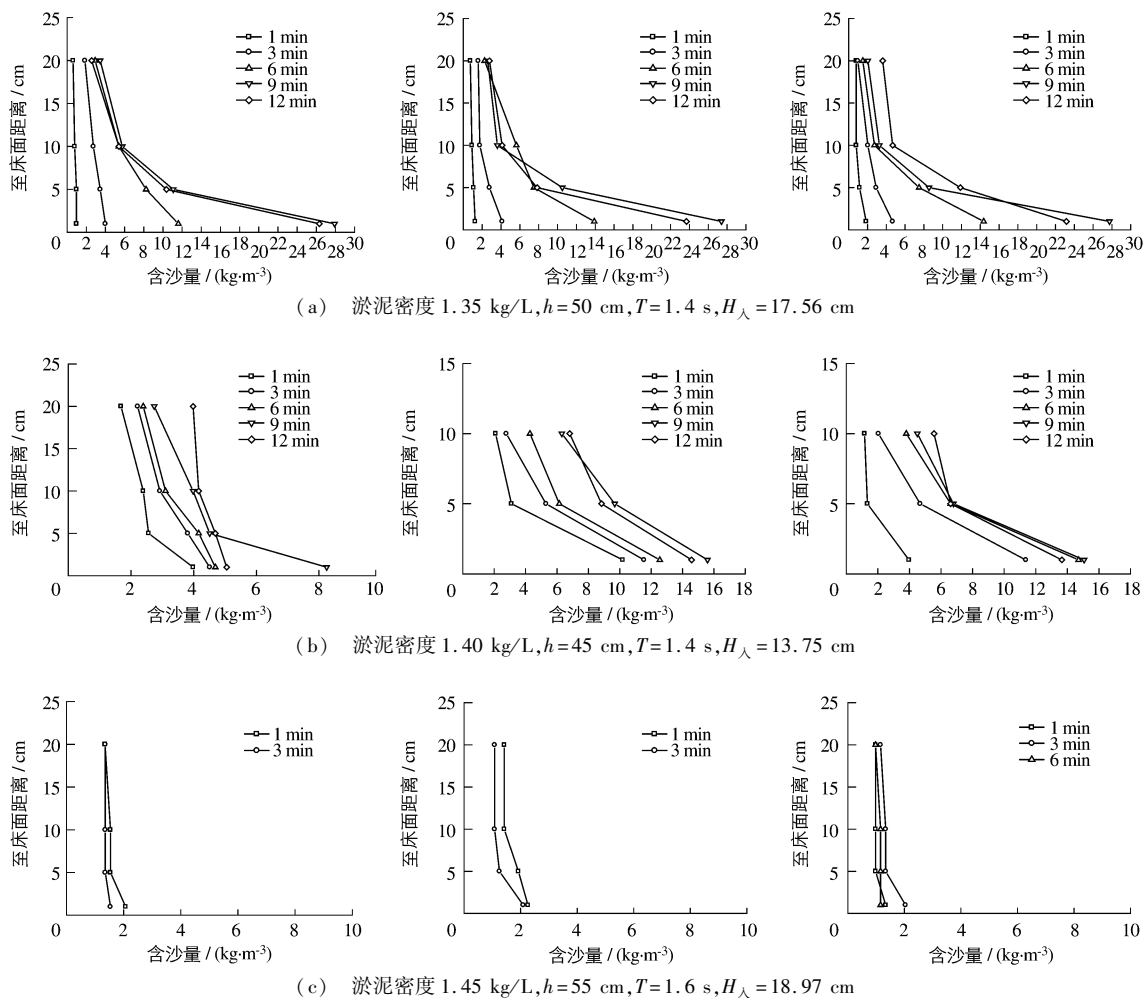


图 2 含沙量垂线分布

Fig. 2 Vertical distribution of sediment concentration

淤泥密度为 1.35 kg/L 时,破碎波引起的水体含沙量最大,其次为 1.40 kg/L ,而 1.45 kg/L 水体含沙量变化很小。不同密度的淤泥在破碎波作用下都会达到某一最大含沙量,相同水深和相同波浪条件时,泥沙重

度小,底部含沙量大;同一密度淤泥,相同水深和周期时,波浪破碎强度大的水体含沙量大。在同一垂线上,淤泥密度为 1.35 和 1.40 kg/L 时,近底层水体含沙量是表层和中间层水体含沙量的几倍,水体存在分层现象;淤泥密度为 1.45 kg/L 时,近底层水体含沙量开始略有增大,几分钟后,垂线上水体含沙量基本一致。

在破碎波浪作用下,淤泥密度为 1.35 kg/L 时,距离床面 1 cm 处可形成超过 30 kg/m³ 的含沙量,距离床面 5 cm 处的也可形成约 10 kg/m³ 的含沙量;淤泥密度为 1.40 kg/L 时,距离床面 1 cm 处可形成约 10 kg/m³ 左右含沙量,距离床面 5 cm 处的也可形成约 5 kg/m³ 的含沙量;淤泥密度为 1.45 kg/L 时,距离床面 1 和 5 cm 处只能形成约 2 kg/m³ 含沙量。

水体含沙量垂线分布试验其实质主要表现为:①床面泥沙起动,有泥沙进入水体;②水体紊动和水质点的净输移使泥沙在水体中掺混和输运。

对于黏性泥沙而言,起动切应力一般表达式为:

$$\tau_c = kc^n \quad (1)$$

式中: k 为待定系数,随泥沙类型和物化特性而变; c 为淤积物浓度; n 为常数, $n=2.0 \sim 2.68$ 。式(1)表明黏性泥沙的起动切应力主要取决于泥沙类型和淤积物浓度,与淤积物浓度是非线性关系,与无黏性泥沙有着根本的区别。

窦国仁等^[13]通过考虑惯性力推导出用波浪底部最大轨迹质点速度或波高表示波浪作用下的泥沙起动公式。对比式(1)可见,淤泥起动时波浪底部最大轨迹质点速度或波高与淤泥密度存在非线性关系。

在波浪沿斜坡传播过程中,水质点速度逐步增大,并在波浪破碎点附近达到最大,波浪破碎后,能量发生衰减,流速减小^[11,14];波浪破碎前水质点正方向(波浪传播方向)最大流速略大于反方向最大流速,波浪破碎处水质点正方向最大流速约为反方向最大流速的两倍多,波浪破碎后水质点正方向最大流速与反方向最大流速大小关系在破碎前和破碎处之间,如水深 45 cm,输入波高为 13.75 cm,波浪周期为 1.4 s 时,垂线 S1, S2 和 S3 在距底 0.2 cm 处正向最大流速分别为 35.20, 43.77 和 39.92 cm/s;反向最大流速分别为 -19.24, -15.26 和 -21.08 cm/s^[14]。从水体紊动角度看,波浪在破碎前,随着水深不断减小,能量越来越集中,造成水体自身的紊动增强,破碎后也会产生较强紊动。

试验结果表明,所采用的波浪条件能够使 3 种不同密度的淤泥起动,相比较而言,密度为 1.45 kg/L 的淤泥黏结力大,起动量较少,水体含沙量较小。当淤泥起动后进入水体,受到水体紊动和水质点净输运作用,泥沙向上层水体扩散和波浪传播方向输运。在波浪破碎处和破碎后水体中的泥沙有部分当地起动的泥沙,有部分输运过来的泥沙。当水体底部含沙量小时,受到波浪紊动扩散作用,水体垂线分布较均匀。当水体底部含沙量较大时,对波浪制紊能力较大,垂线分布很难趋于均匀,底部含沙量是表层含沙量的好几倍,这种情况含沙量垂线分布特征与破碎波作用下的粉砂含沙量垂线分布特征相似^[9,11]。

4 结 语

在缓斜坡(1:200)上对 3 种不同密度淤泥进行了崩破波作用下的垂线含沙量分布试验,结果表明:

(1)波浪传播过程中引起的水体含沙量与床面淤泥密度关系密切,具有较强的非线性,破碎波掀沙和输沙能力强于非破碎波。

(2)淤泥密度小于 1.45 kg/L 时,在破波点前底部就开始形成高含沙量区,在破波点附近含沙量达到最大;离破波点一定距离后,随着波高的减小,水体紊动减弱,出现明显泥沙分层现象。波浪破碎位置处,泥沙床面形成冲刷坑。

(3)当水体底部含沙量小时,水体垂线分布较均匀。当水体底部含沙量较大时,垂线分布很难趋于均匀,底部含沙量是表层含沙量的好几倍。

(4)破碎波作用淤泥引起的含沙量垂线分布特征与粉砂的情况相似,但床面不会出现沙波。

参 考 文 献:

- [1] 夏东兴, 王文海, 武桂秋, 等. 中国海岸侵蚀述要[J]. 地理学报, 1993, 48(5): 468-475. (XIA Dong-xing, WANG Wen-hai, WU Gui-qiu, et al. Coastal erosion in China[J]. Acta Geographica Sinica, 1993, 48(5): 468-475. (in Chinese))
- [2] 唐寅德, 虞志英, 陈德昌. 连云港地区淤泥质海滩沉积类型和成因[C]//连云港回淤研究论文集. 南京: 河海大学出版社, 1990: 23-34. (TANG Yin-de, YU Zhi-ying, CHEN De-chang. Sediment type and formation in muddy flats of lianyungang [C]//The Collected Papers of Research on the Sediment in Lianyungang Port. Nanjing: Hohai University Press, 1990: 23-34. (in Chinese))
- [3] 姚云汉. 破碎波作用下的泥沙悬浮[D]. 天津: 天津大学, 1991. (YAO Yun-han. Sediment suspension under breaking wave action[D]. Tianjin: Tianjin University, 1991. (in Chinese))
- [4] OGSTON A S, STERNBERG R W. Effect of wave breaking on sediment eddy diffusivity, suspended-sediment and longshore sediment flux profiles in the surf zone[J]. Continental Shelf Research, 2002, 22(4): 633-655.
- [5] SHIBAYAMA T, WINYU R. Vertical distribution of suspended sediment concentration in and outside surf zone[J]. Coastal Engineering in Japan, 1993, 36(1): 49-65.
- [6] NIELSEN P. Suspended sediment concentrations under waves[J]. Coastal Engineering, 1986, 10(1): 23-31.
- [7] KOS'YAN R D. Vertical distribution of suspended sediment concentrations of seawards of the breaking zone[J]. Coastal Engineering, 1985, 9(2): 171-187.
- [8] SMITH G G, MOCKE G P. Interaction between breaking/broken waves and infragravity-scale phenomena to control sediment suspension transport in the surf zone[J]. Marine Geology, 2002, 187(3-4): 329-345.
- [9] 韩鸿胜, 李世森, 赵群, 等. 破碎波作用下粉沙悬移质浓度垂向分布的试验研究[J]. 泥沙研究, 2006(6): 30-36. (HAN Hong-sheng, LI Shi-sen, ZHAO Qun, et al. Experimental study on fine sediment concentration under breaking waves[J]. Journal of Sediment Research, 2006(6): 30-36. (in Chinese))
- [10] 边淑华, 胡泽建, 迟万清, 等. 粉砂质海岸大风天泥沙运动研究[J]. 海洋科学, 2007, 31(12): 4-8. (BIAN Shu-hua, HU Ze-jian, CHI Wan-qing, et al. Sediment movement on the silty coast during a storm[J]. Marine Sciences, 2007, 31(12): 4-8. (in Chinese))
- [11] 徐华, 夏云峰, 陈中, 等. 崩破波作用下粉沙悬浮运动特性的试验研究[J]. 泥沙研究, 2012(5): 58-64. (XU Hua, XIA Yun-feng, CHEN Zhong, et al. Experimental study of silt suspension movement under spilling waves[J]. Journal of Sediment Research, 2012(5): 58-64. (in Chinese))
- [12] 蒋德才, 刘百桥, 韩树宗. 工程环境海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2005: 96-97. (JIANG De-cai, LIU Bai-qiao, HAN Shu-zong. Engineering environmental oceanography[M]. Beijing: China Ocean Press, 2005: 96-97. (in Chinese))
- [13] 窦国仁, 窦希萍, 李提来. 波浪作用下泥沙的起动规律[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2001, 31(6): 566-573. (DOU Guo-ren, DOU Xi-ping, LI Ti-lai. Incipient motion of sediment under wave action[J]. Science in China(SerE), 2001, 31(6): 566-573. (in Chinese))
- [14] 高祥宇, 高正荣. 淤泥质海岸破波带泥沙运动特性试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2012. (GAO Xiang-yu, GAO Zheng-rong. Experimental research of sediment movement feature in surf zones along sludge coast[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2012. (in Chinese))

Experimental studies on sediment concentration distribution under breaking waves action along muddy coast

GAO Xiang-yu, GAO Zheng-rong, DOU Xi-ping

(*State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: The muddy coast is an important part of China's coast, and the wave-lifted sand and tide-transported sand are the main forms of sediment movement along the muddy coast. The sediment concentration is rapidly going up during heavy storm waves. The high sediment concentration can cause terrible sediment back-silting within the ports and waterways. In the past, the experimental studies mainly focused on sand and silt concentration under breaking waves. In this study, wave-current flume test studies are carried out for the distribution characteristics of the sediment concentration and mechanism of lifted sand under spilling waves action, in which the gentle slope (1 : 200) is set up for testing wave movement. The distribution characteristics of the mud concentration having mud density of 1.35, 1.40, 1.45 kg/L and mechanism of the wave-lifted sand by the action of the spilling waves have been analyzed respectively through the flume tests. The mud for model tests is taken from the trial excavating channel for the Xuwei waterway. Research results show that the capacity of the breaking wave-lifted sand and the mud density have the strong nonlinear relationships. And the bottom becomes a high sediment concentration area beyond the wave breaking point, the sediment concentration is up to the maximum around the wave breaking point, and there is water stratification behind a certain distance when mud density is less than 1.45 kg/L. When there is a greater sediment concentration in the bottom, the vertical distribution characteristics of both mud and silt concentration are nonuniform under the breaking waves action.

Key words: muddy coast; sediment concentration distribution; breaking waves action; mud density