

珊瑚沙质岸线防浪固沙障水槽模拟试验研究

屈建军¹, 李绍武², 蒋冲¹, 胡文励², 柳叶², 李启航¹

[1.南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458;

2.天津大学 水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300354]

摘要: [目的] 开展珊瑚沙质岸线防浪固沙障水槽模拟试验研究, 为雷州半岛徐闻珊瑚礁国家级自然保护区灯楼角珊瑚岸礁沙质海滩的防浪固沙提供理论依据, 也为同类沙质海岸线港口的治理稳固提供技术支撑。[方法] 通过水槽试验模拟方法探究灯楼角岸线沙袋沙障措施的海岸侵蚀防护效应。[结果] ①设置的菱形布置沙袋沙障整体结构的复合作用对于沙障稳定性影响显著, 直径在 5 cm 及以上的两组沙障可达自身稳定。按重力相似准则推算, 相当于原型直径 50 cm。②沙袋沙障通过增加床面粗糙度, 减弱水动力强度, 进而降低泥沙输移强度, 达到固沙目的, 且随着沙障直径增加, 其掩护效果愈发显著; ③在来浪周期为 1.90 s, 水深为 0.4 m 的条件下, 试验观察到的沙纹高度为 3~4 cm。由此实际工程中选用直径为 50 cm 及以上截面直径的沙障可以阻控沙波的迁移和沙纹运移。④菱形布置的沙障受斜向浪作用较小, 稳定性优于正向布置。因此宜采用菱形布置沙障减少受斜向浪的作用。[结论] 以沙袋沙障作为海岸侵蚀的防护材料, 达到了以沙治沙的目的, 生态环保且成效较好, 具有重要科学指导意义和实践推广价值。

关键词: 珊瑚沙质岸线; 海岸侵蚀; 沙袋沙障; 模拟试验

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)06-0018-07

中图分类号: P931, S157.2

文献参数: 屈建军, 李绍武, 蒋冲, 等. 珊瑚沙质岸线防浪固沙障水槽模拟试验研究[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 18-24. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.003; Qu Jianjun, Li Shaowu, Jiang Chong, et al. Flume-based experimental study on wave prevention and sand fixation functions of sand barriers applied to coral sandy coastlines [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 18-24.

Flume-based Experimental Study on Wave Prevention and Sand Fixation Functions of Sand Barriers Applied to Coral Sandy Coastlines

Qu Jianju¹, Li Shaowu², Jiang Chong¹, Hu Wenli², Liu Ye², Li Qihang¹

[1. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory

(Guangzhou), Guangzhou, Guangdong 511458, China; 2. State Key Laboratory of

Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300354, China]

Abstract: [Objective] The flume simulation research on wave prevention and sand stabilization counter measures for coral sandy coastlines were studied in order to provide a theoretical basis for the project to protect coastlines against wave erosion along the Denglujiao shoreline, located in the Xuwen National Coral Reef Nature Reserve on the Leizhou Peninsula, and to provide technical support for similar coastal areas. [Methods] The coastal erosion protection effect of sand-bag barrier measures was determined for the Denglujiao coastline using a flume experiment simulation method. [Results] ① The composite effect of the overall structure of the diamond-shaped sand-bag barrier had a significant impact on the stability of the sand barrier. Two groups of sand barriers with a diameter of 5 cm or above was able to achieve self-stability. Calculated according to the gravity similarity criterion, this was equivalent to 50 cm diameter of the prototype; ② The sand-bag barrier achieved sediment fixation by increasing the roughness of the bed surface, weakening the hydrodynamic strength, and thereby reducing the intensity of sediment transport. As

收稿日期: 2023-08-31

修回日期: 2023-10-13

资助项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项“南海和大湾区资源环境可持续利用及治理研究”(GML2019ZD0601)

第一作者: 屈建军(1959—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事风沙防治工程、沙漠环境方面的研究。Email: qujianj@lzb.ac.cn.

通信作者: 李绍武(1962—), 男(汉族), 山东省莱州市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事河口海岸动力及岸滩演变方面的研究。Email: lishaowu@tju.edu.cn.

the diameter of the sand barrier increased, its shielding effect became more significant; ③ For a wave period of 1.90 s and a water depth of 0.4 m, the height of sand ridges observed in the experiment were 3—4 cm. Therefore, in practical projects, sand barriers with a diameter of 50 cm or more can prevent and control the migration of sand waves and sand ridges; ④ The sand barrier arranged in a diamond shape was less affected by oblique waves and had better stability than the sand barrier arranged in a normal direction. Therefore, it is advisable to use a diamond-shaped sand barrier to reduce the effect of oblique waves. [Conclusion] The use of sand-bag barriers as protective materials for coastal erosion not only achieved the goal of sand control, but also produced favourable ecological and environmental protection effects. These results could provide important scientific guidance and have significant and practical promotion value.

Keywords: coral sandy coastline; coastal erosion; sand-bag barrier; simulation experiment

珊瑚沙岛是中国重要的海洋国土资源,珊瑚沙流失危及国土安全^[1-3]。近年来,全球气候变化导致海平面上升,风暴潮等极端天气灾害性事件频发,加之日益频繁的海岸带高强度开发(海洋养殖业、旅游产业、工程施工、填海造地等),自然和社会经济多要素共同作用导致珊瑚礁海岸侵蚀现象日益严峻,特别是南方沿海地区^[1-3]。海岸侵蚀不仅造成土地流失,危及沿海、建筑物安全,同时也引发了严重的生态后果,包括珊瑚栖息地生境质量退化、海洋污染等,而珊瑚群落退化进一步降低了珊瑚沙岛稳定性,加速了海岸侵蚀和岛礁萎缩^[4-5]。

位于广东省雷州半岛西南岬的徐闻珊瑚礁国家级自然保护区濒临热带海洋,其中灯楼角珊瑚岸礁床面多为沙壤和沙质土(图 1a)。保护区海岸和潮间带基本上是沙滩和岸礁,主要为滨海—浅海相砂泥质碎屑岩和湖泊相含膏盐碎屑岩构造,岩性特征以浅灰绿色粉砂岩、棕红色泥岩和灰黑色玄武岩为主。长在灰黑色玄武岩上的珊瑚种群较多,较为茂盛^[6-7]。20 世纪 90 年代以来,随着海洋养殖业的兴起,徐闻珊瑚带上曾出现众多珍珠养殖场,珊瑚礁受到严重破坏,海岸侵蚀也较为严重^[6-10]。侵蚀搬运作用导致海岸泥沙沉积于岛礁床面,形成大量的沙泥质片状堆积(图 1b)。

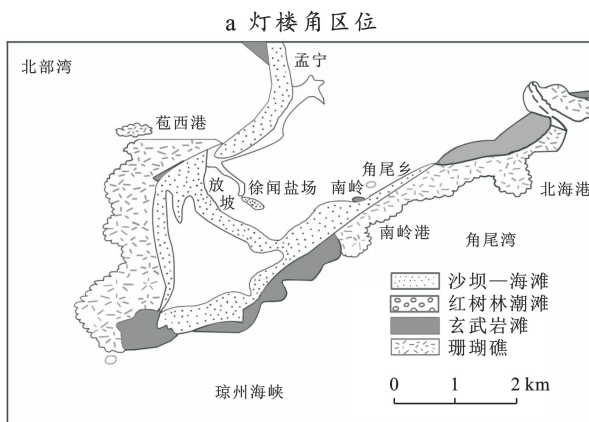


图 1 灯楼角区位和珊瑚礁床面存留沙泥质片状堆积

Fig.1 Location of Dengloujiao sedimentary and muddy sheet deposits remaining on coral reef bed

近年来,针对珊瑚礁海岸波浪水动力研究取得了较大进展,包括岸礁礁冠对波浪传播变形及增水影响^[11]、潮汐流影响下珊瑚岛礁附近波浪传播变形和增水效应^[12]、防浪建筑物影响下珊瑚礁海岸波浪传播变形^[13]、礁面糙率变化下珊瑚礁海岸附近波浪传播变形^[14]、珊瑚礁破碎带附近波浪演化和波生流特性等^[15]方面。海浪作用下不可避免地引发岸滩侵蚀,进而引发严重的生态环境效应,包括海岸退缩,危及海岸设施安全和栖息地环境,诱发系列自然灾害^[16-17]。相应地,针对海岸侵蚀的防护理论体系、技术方法和工程实践取得了显著进展,包括构建硬质海岸工程(海堤、

突堤、离岸堤等)^[18]、构建软质海岸环境^[19]、生物护滩措施^[20]、海岸(堤)防护林带等^[21]。自从 1956 年包兰铁路沙坡头段风沙防护体系和 1995 年塔克拉玛干石油公路风沙防护体系中应用 1 m×1 m, 20 cm 高的草方格固沙取得成功(图 2)以后,草方格固沙障在国内外得到广泛应用^[22-23]。其特点是能够降低风速、阻沙固沙、稳固沙面和保水保土的作用,实现沙质床面的快速固定和生态恢复理想效果^[22-23]。借鉴草方格的固沙原理,本研究开发了“防浪固沙障”专利技术^[24],采用就地取材以沙治沙的理念,将土工布织成筒状就地装沙,将装满沙袋摆成菱形,围成 1 m×1 m 方格,啃

合对接,捆扎形成整体,形成障高 10~20 cm 的格状防浪固沙障,达到削弱海浪对沙滩的侵蚀,稳固流沙表面,防浪固沙的作用。本研究拟通过防浪固沙袋沙

障水槽模拟试验筛选筒状最佳高度,从而为灯楼角珊瑚岸礁沙质海滩的防浪固沙提供理论依据,也可为同类沙质海岸线港口的治理稳固提供技术支撑。

a 塔克拉玛干石油公路



b 包兰铁路沙坡头段



图 2 草方格固沙防护工程案例

Fig.2 Case study of grass grid sand fixation and protection engineering

1 防浪固沙障水槽模型试验设置

为了测试防浪固沙障的防浪性能,以灯楼角珊瑚沙质海滩采集的泥沙为基础,于 2023 年 1 月在天津大学港口与海岸工程实验室大型波流水槽中进行了沙障稳定性及沙障固沙效果试验。模拟试验的参数设置参照灯楼角地区的实际情况。试验水槽长 80 m,宽 2 m,高 1.8 m(图 3),安装的造波机具有二阶非线性

性造波和主动式吸收功能^[25]。试验采用长 50 cm 的圆形截面沙袋,直径分别为 2 cm,3 cm,5 cm 和 7 cm。沿波浪传播方向布置了 600 cm 长沙床,宽度与水槽宽度一致,为 200 cm。沙障铺设在沙床中部。

试验同时进行沿程波要素数据采集,浪高仪采集频率为 20 Hz。沙障布置采用正四边形和菱形(正向和斜放)两种不同的形式,走向按对称轴与波浪传播方向一致设置,具体摆放方法如图 4 所示。

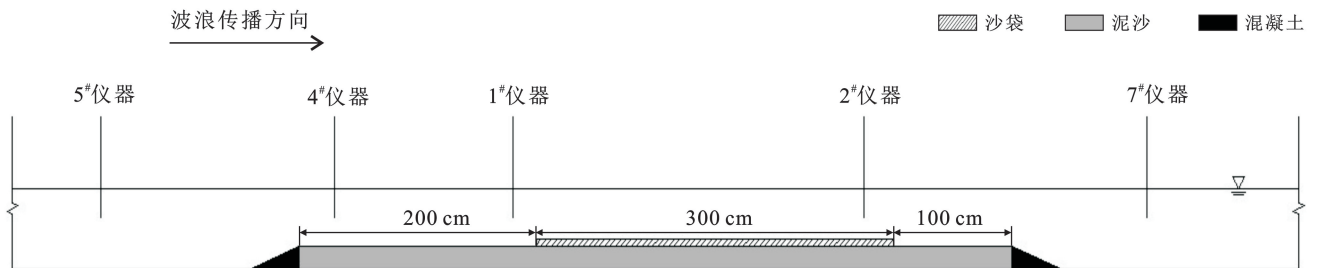


图 3 水槽试验段沙床及测试仪器布置示意图

Fig.3 Schematic diagram of sand bed and testing setup layout in water tank test segment

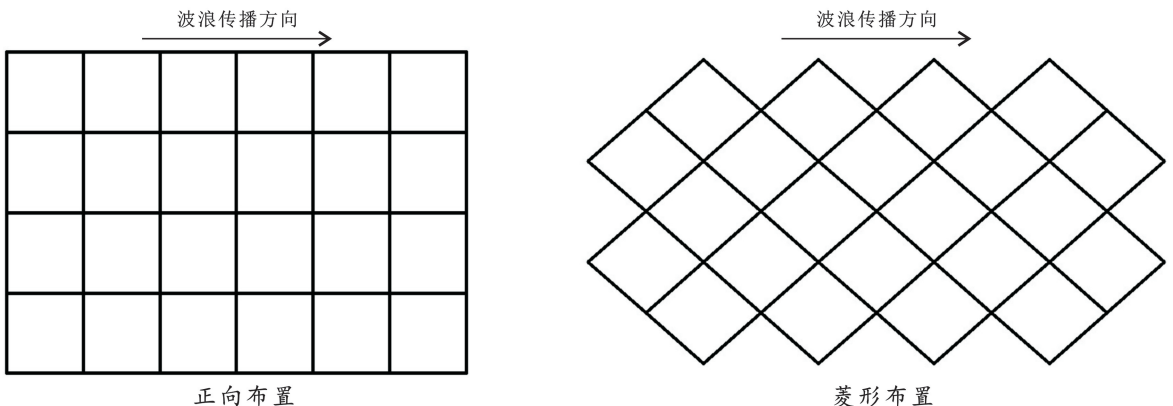


图 4 试验沙障布置形式示意图

Fig.4 Schematic diagram of sand barrier layout in experiment

所有组次试验水深均固定为 40 cm(沙床表面到水面距离)。模型几何比尺按 1:10 进行设置。波浪参数按重力相似准则确定,波浪周期分别为 1.90 s(对应原型 6 s)和 3.16 s(对应原型 10 s)两种,并分别进行了规则波和不规则波试验。规则波选用二阶斯托克斯波,不规则波采用 JONSWAP 谱,波高和周期分别为有效波高和谱峰周期。试验采用波高从小逐渐增大的方法,直至达到极限波高。在 40 cm 水深下,实测规则波最大波高大致在 19.1~21.5 cm,不规则波的波高略大一些,最大波高为 23.5 cm。

具体模型试验组次及对应条件详见表 1。造波个数主要以现场沙纹发展达到稳定为依据而定,部分组次造波个数远超稳定波浪个数。

2 试验结果讨论

2.1 沙障防浪结构稳定性

图 5 展示了不同直径和不同平面布置方式的沙障稳定性试验结果。直径 2 cm 和 3 cm 的沙障大部分出现了不同程度的弯曲现象,而 5 cm 及 7 cm 直径

沙障基本未出现弯曲现象,表明在试验条件下直径为 5 cm 及以上的沙障可以达到自稳定。5 cm 正向摆放的沙障阵列边缘处也出现失稳现象,但斜向摆放的沙障基本保持稳定。结果表明:①斜向摆放的沙障较正向摆放的沙障稳定性稍高;②处于端部的沙障稳定性较差,需要特别加固;③有纵向支撑沙障较无纵向支撑沙障的明显更稳定。

表 1 试验组次及对应条件

Table 1 Test cases and corresponding conditions

沙障直径	布置形式	波周期/s	波浪类型	波数/个
2 cm	正放	1.90	规则波	280
3 cm	正放	1.90	规则波	600
	正放	3.16	规则波	800
5 cm	正放	1.90	规则波	1 200
	正放	1.90	不规则波	750
	斜放	1.90	规则波	1 200
	斜放	1.90	不规则波	640
7 cm	斜放	1.90	规则波	1 000

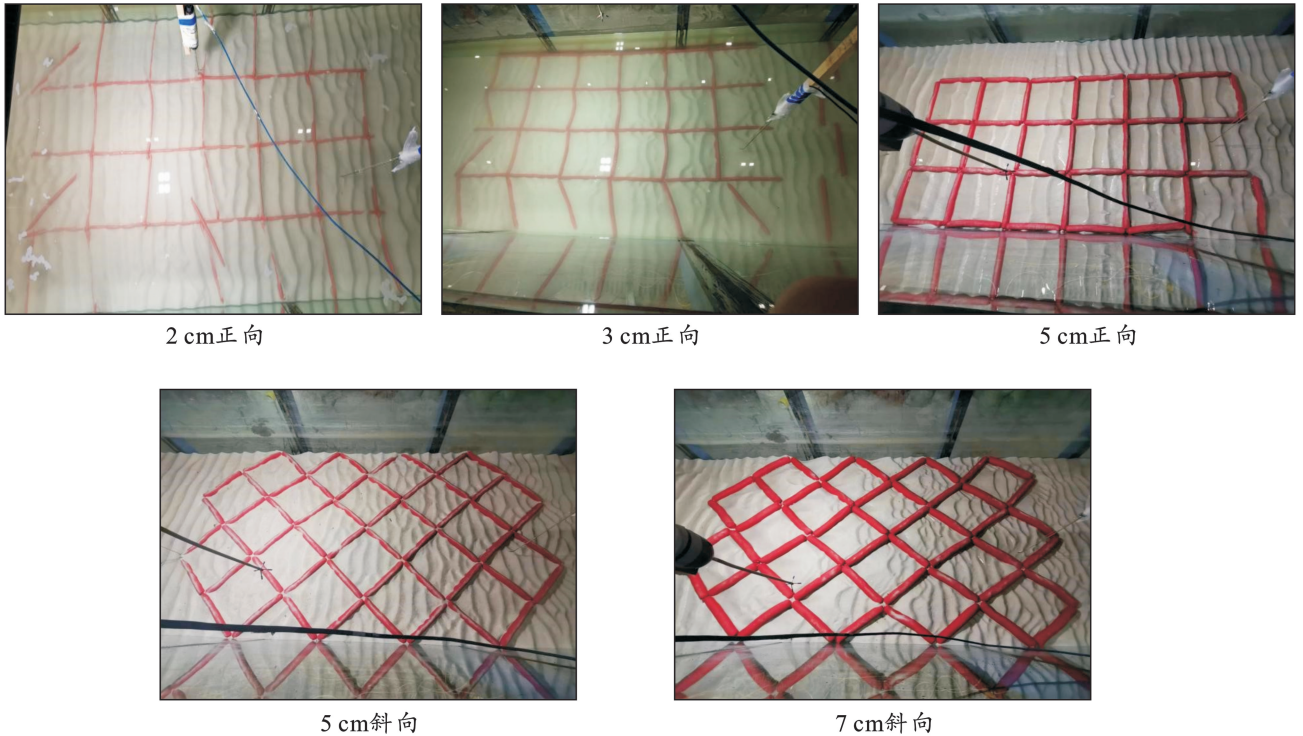


图 5 不同直径和不同方向摆放沙障的试验效果

Fig.5 Experimental effect of sand barriers with different diameters and placed in different pattern

正向摆放和斜向摆放两种布置形式的区别是波浪入射方向和沙障摆放方向的夹角不同,而斜向布置形式的结构稳定性要明显优于正放。这主要是因为作用在沙障上的波浪力在平面上可分解为垂直沙障

长度方向和平行沙障长度方向两个分量,两个方向上沙障的起动方式分别为滚动起动和滑动起动。沙袋滚动较滑动要容易得多,并且各个沙障相互支撑,相互制约,不容易发生运动。另一方面,斜向沙障所受

正向波浪力较小,因此稳定性高于正向摆放的沙障。端部沙障稳定性差一方面是由于端部波浪作用力强,另一方面是由于端部沙障受其他沙障的约束作用较小。有纵向沙障支撑更稳定的现象体现了沙障间的这种互锁作用,实际海岸波浪方向是多变的,应以正向浪作为防护重点。

2.2 防浪沙障作用下的泥沙输移

泥沙输移的规律大致可以通过实测床面变形进行判断。为研究在垂直波浪传播方向上,即水槽横断面上剖面形态的差异,沿横断面方向大致均匀地选取了 5 个距边壁不同距离的纵剖面来进行观察(图 6),其中 1[#]和 2[#]剖面间距为 20 cm,2[#]和 3[#]剖面间距 30 cm,3[#]~5[#]剖面间距 40 cm。图 7 为 2 cm 直径的沙障在不同位置的地形剖面。共打了 280 个波浪,包括 20 个入射波高 12.55 cm 的未破碎波,20 个入射波高 15.69 cm 的未破碎波,和 240 个入射波高 20~21 cm 的破碎波。可以看到,沙床上形成了沙纹并向前推移。沙障对于沙波运移虽然有一定阻挡作用,但由于沙障的直径较小,泥沙仍可以越过沙障向前输移,部分沙障甚至完全被沙掩盖。从测量结果来看,横向上纵剖面形态并无明显的变化规律。

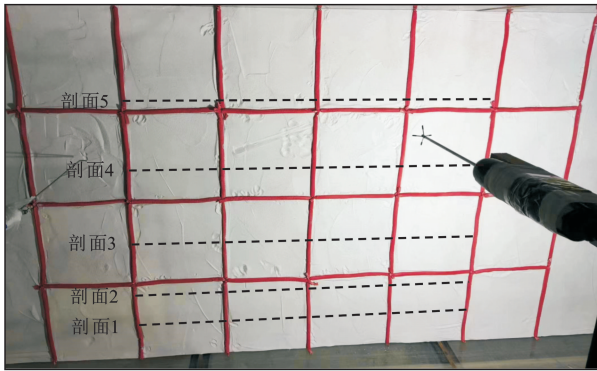


图 6 直径 2 cm 沙袋试验测量剖面位置

Fig.6 Measurement positions for 2 cm diameter sandbag case

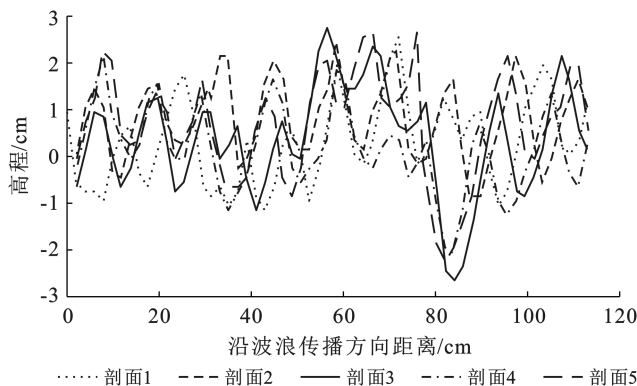


图 7 直径 2 cm 沙袋地形剖面形态变化

Fig.7 Morphological changes of 2 cm diameter sandbag terrain profile

图 8 为直径 3 cm 的沙障分别在两种不同周期分别包含 600 和 800 个波浪作用下的地形实测结果。沙障左侧有明显泥沙堆积,表明 3 cm 的沙障阻沙效果较 2 cm 沙障有显著提高,其中周期较长的波浪的泥沙输运效果比周期较短的波浪堆积效果更为明显。而沙障右侧地形较低,原因是右端的沙障已经因失稳而离位,失去阻沙作用。经过 600 个 1.90 s 和 800 个 3.16 s 的波后,沙障掩埋情况加剧(图 9),表明 3 cm 的沙障仍不足以抵御泥沙输移。这一现象很容易从沙纹尺度得到解释,因为沙纹尺度大致在 3~4 cm。

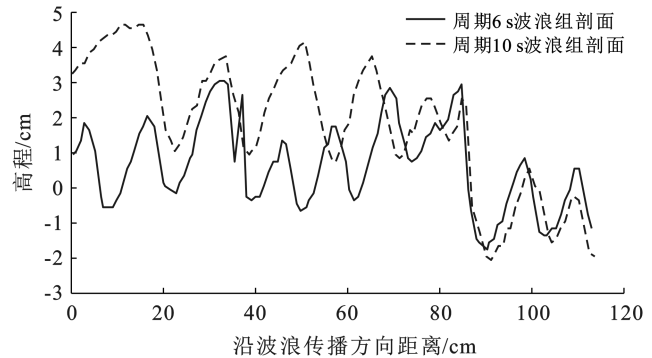


图 8 直径 3 cm 沙袋地形剖面形态变化

Fig.8 Morphological changes of 3 cm diameter sandbag terrain profile

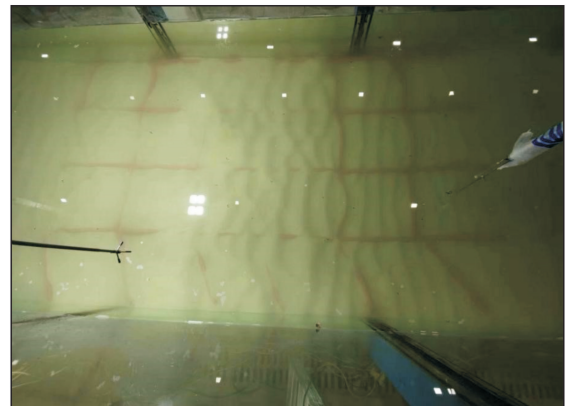


图 9 直径 3 cm 沙障 1 400 个波(包含 1.90 s 和 3.16 s)后的掩埋情况

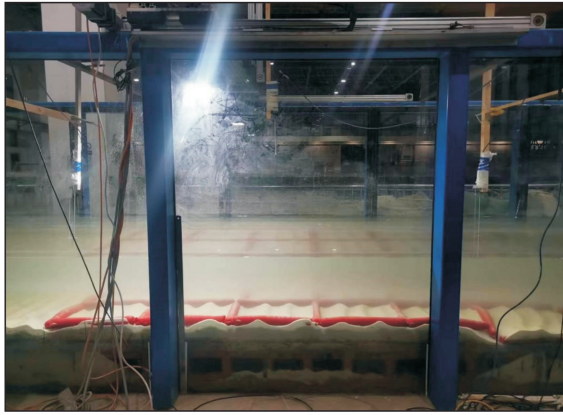
Fig.9 Burial situation after 1 400 waves (including 1.90 s and 3.16 s) of a 3 cm diameter sand barrier

进一步观察可以发现,沙障对于沙波的发展有一定影响。为了便于对比,在 5 cm 沙障试验中,将水槽一侧去除一部分沙障。可以看到,无沙障一侧形成极其规则的沙纹,而有沙障一侧沙纹在纵向上不连续(图 10),但沙纹尺度与无沙障一侧差异并不大。

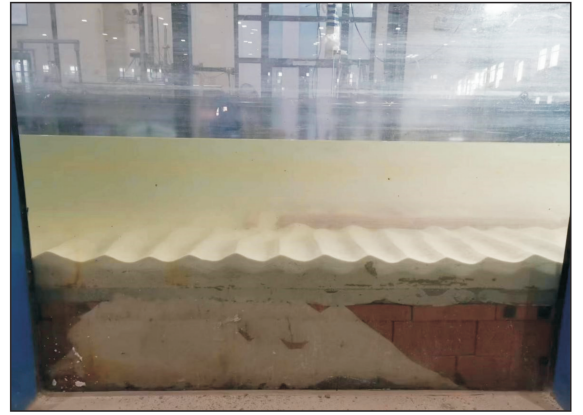
从地形剖面实测结果看(图 11—12),5 cm 直径沙障阻挡推移质输移的效果显著,泥沙未能越过沙袋,泥沙并无显著输移过程,因此在沙障前无堆积。此外,500 个和 1000 个破碎波之后的沙障剖面差异

很小,沙纹波峰位置和沙障前堆积高度都几乎不再变化,说明方格内的泥沙已基本不再向前推移,分布形态趋于稳定,但泥沙仍有一定悬扬。不规则波与规则波的作用有一定差异,规则波的沙障前会形成一定冲

刷坑,而不规则波的冲刷坑不明显。7 cm 沙障前泥沙堆积和沙障后冲刷坑都比较明显(图 13),其中沙障前堆积高度可达 6 cm,但沙障间的沙纹度未见增大,地形也未见整体抬高,表明泥沙基本不存在持续输移。



有沙障一侧



无沙障一侧

图 10 直径 5 cm 沙袋正向布置不规则波试验后场地情况

Fig.10 Site conditions after irregular wave test with 5 cm diameter sandbags arranged forward

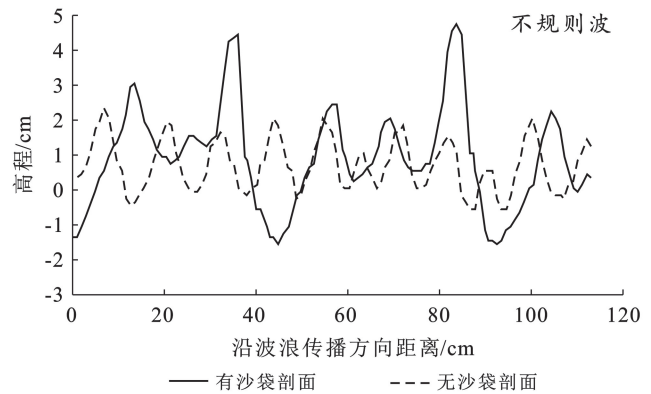
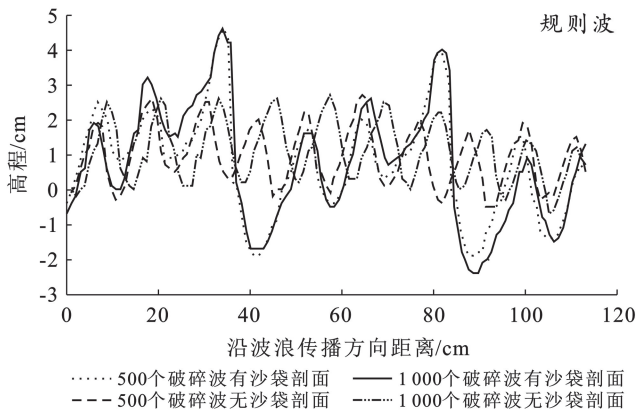


图 11 直径 5 cm 沙袋正向布置剖面形态变化

Fig.11 Changes in profile form of 5 cm diameter sandbags forward layout

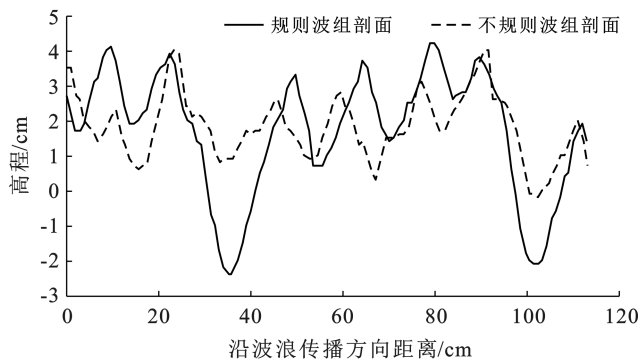


图 12 直径 5 cm 沙袋斜向布置剖面形态变化

Fig.12 Changes in profile form of 5 cm diameter sandbags oblique layout

2.3 试验结果在原型海岸的推广

依据重力相似准则,长度比尺 $\lambda_L = 10$ 将水槽试验的结论推广至原型,相当于原型来浪周期为 6 s,水

深为 4 m,最大波高为 2.35 m,沙障直径增大到 50 cm 时沙障自身可以稳定。实际海岸泥沙运动中的沙波高度可能比较复杂,但一般远小于 50 cm,从阻挡沙纹运动角度沙障直径不需要达到 50 cm 就可以较好地阻止推移质泥沙的输移,而 50 cm 直径主要是考虑沙障自身稳定重量。

3 讨论与结论

(1) 直径为 2,3 cm 的沙障自身不能稳定,但在沙障互锁制约下,沙障整体未破坏;沙袋直径增大到 5 cm 后沙障自身可稳定,按重力相似准则,相当于原型 50 cm,可抵御周期为 6 s,波高为 2.35 m 的来浪,且该高度可以阻止沙波的运移,从而达到抑制推移质输沙和岸滩侵蚀的目的。

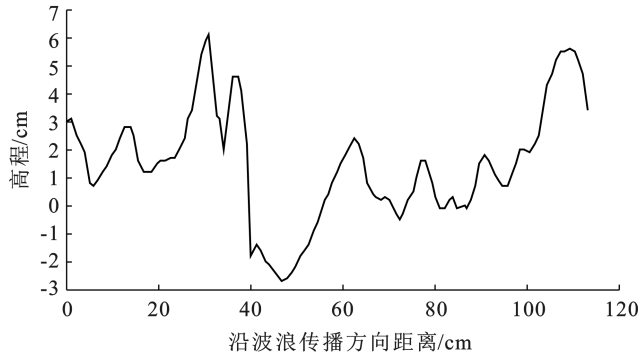


图 13 直径 7 cm 沙袋剖面形态变化

Fig.13 Changes in 7 cm diameter sandbag terrain profile

(2) 菱形布置沙障整体结构的连锁作用对沙障稳定性有着显著影响。沙障阵列边界外缘的沙障受波浪作用力大,互锁作用弱,容易破坏和失稳,因此实际工程中应增大截面尺寸或进行特别加固。

(3) 波浪作用下,沙障的固沙效果主要体现在两方面:一方面是通过增加床面粗糙度来减弱水动力强度,进而降低泥沙输移的强度,沙障直径越大,其掩护效果越好;另一方面是通过阻挡沙纹迁移而阻止推移质的输移。

(4) 正向布置的沙障受波浪正面作用力较大,而斜向(菱形)布置的沙障受正向浪在该方向上的分量作用,作用力较小,因此同尺寸(长度、直径)下斜向布置形式的稳定性优于正向布置,宜采用斜向(菱形)布置沙障。

(5) 本文借鉴了沙漠风沙治理的方法,将其引入到海岸固沙的情境中,通过开展沙障防浪水槽试验,证明在海岸带布置沙障可以有效地抑制波浪引起的输沙,从而缓解岸滩侵蚀。本文的工作拓展了沙障固沙的应用范围,为传统的海岸带防护与修复工作提供了新思路。

[参 考 文 献]

[1] 蔡锋.中国海滩资源概述[M].北京:海洋出版社,2019.
 [2] 庄振业,沈才林.山东半岛若干平直砂岸近期强烈蚀退及其后果[J].青岛海洋大学学报,1989,19(1):90-98.
 [3] 蔡锋.华南海滩动力地貌过程[M].北京:海洋出版社,2008.
 [4] 陈吉余.中国海岸带地貌[M].北京:海洋出版社,1995.
 [5] 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):468-476.
 [6] 赵焕庭,宋朝景,王丽荣,等.雷州半岛灯楼角珊瑚礁初步

观察[J].海洋通报,2001,20(2):87-91.

- [7] 赵焕庭,王丽荣,宋朝景,等.雷州半岛灯楼角珊瑚岸礁的特征[J].海洋地质与第四纪地质,2002,22(2):35-40.
 [8] 赵焕庭,王丽荣,宋朝景,等.徐闻县西岸珊瑚礁存在与发展的条件[J].热带地理,2008,28(3):234-241.
 [9] 廖宝林,刘丽,刘楚吾.徐闻珊瑚礁的研究现状与前景展望[J].广东海洋大学学报,2011,31(4):91-96.
 [10] 李锋,沈成,张艳苹,等.广东徐闻珊瑚礁国家级自然保护区珊瑚种类及覆盖率分析[J].江苏农业科学,2019,47(24):304-308.
 [11] 姚宇,袁万成,杜睿超,等.岸礁礁冠对波浪传播变形及增水影响的试验研究[J].热带海洋学报,2015,34(6):19-25.
 [12] 姚宇,唐政江,杜睿超,等.潮汐流影响下珊瑚岛礁附近波浪传播变形和增水试验[J].水科学进展,2017,28(4):614-621.
 [13] 贾美军,姚宇,陈松贵,等.防浪建筑物影响下珊瑚礁海岸波浪传播变形试验[J].海洋工程,2020,38(6):53-59.
 [14] 姚宇,张起铭,蒋昌波.礁面糙率变化下珊瑚礁海岸附近波浪传播变形试验[J].科学通报,2019,64(9):977-985.
 [15] 姚宇,唐政江,杜睿超,等.珊瑚礁破碎带附近波浪演化和波生流试验研究[J].海洋科学,2017,41(2):12-19.
 [16] 蔡锋.海滩养护理论与实践[M].北京:海洋出版社,2010.
 [17] 蔡锋.中国海滩养护技术手册[M].北京:海洋出版社,2015.
 [18] Komar P D. Beach Process and Sedimentation [M]. 2nd edition. New Jersey: Prentice-Hall, 1998.
 [19] Bruun P. Coast Erosion and the Development of Beach Profiles [M]. Beach Erosion Board Technology: U.S. Army Corps of Engineers Beach Erosion Board Corps of Engineers, 1954.
 [20] Dean R G. Equilibrium beach profiles: characteristics and applications [J]. Journal of Coastal Research, 1991,7(1):53-84.
 [21] 罗时龙,蔡锋,王厚杰.海岸侵蚀及其管理研究的若干进展[J].地球科学进展,2013,28(11):1239-1247.
 [22] 刘嫫心.包兰铁路沙坡头地段铁路防沙体系的建议及其效益[J].中国沙漠,1987,7(4):1-11.
 [23] 沙坡头沙漠研究站.腾格里沙漠地区流沙治理研究[M].宁夏 银川:宁夏人民出版社,1980.
 [24] 屈建军,王涛,肖洪浪,等.防浪固沙障:中国:200420041517.7[P].2004.
 [25] 中华人民共和国国家版权局.推板式造波机二阶非线性造波实现软件 V1.0[CP/DK].天津大学,软著登字 7484389.