

· 综 合 ·



新型空心块体促淤堤断面波浪特性试验研究*

刘 猛

(上海河口海岸科学研究中心 河口海岸交通行业重点实验室, 上海 201201)

摘要: 依据长江口南汇边滩促淤工程的波浪条件及物理模型试验方法对新型空心块体促淤堤的断面波浪特性开展研究, 结果表明: 1) 单质量 3 t 的空心四面块体促淤堤堤身孔隙率约为 66%; 2) 波能消减率随着堤身高度的增加线性增加, 波高消减率随堤身高度增加的变大速率较波长消减率平均快 4 倍以上; 3) 与传统抛石加护面块体促淤堤相比, 空心四面块体促淤堤具有“堤身对地基压载显著减小”、“施工简便”、“强风浪作用下生存力强且修复简便”以及“有利于重复利用”等优点; 4) 提出了一种特定条件下的空心四面块体促淤堤的临界稳定断面形态, 在该临界断面条件下, 每 100 m 促淤堤块体数量约为 3 210, 水位较低时其消浪效果较传统抛石加护面块体促淤堤略差, 但水位较高时其消浪效果接近甚至显著超过传统促淤堤。

关键词: 透空式促淤堤; 空心四面块体; 波浪; 临界稳定断面形态; 消浪效果

中图分类号: TV 139.2 文献标志码: A 文章编号: 1002-4972(2015)11-0001-07

Experimental study on wave characteristics of hollow tetrahedron siltation embankment's section

LIU Meng

(Key Laboratory of Estuarine & Coastal Engineering Ministry of Transports, Shanghai Estuarine and Coastal Research Center, Shanghai 201201, China)

Abstract: According to the wave conditions of Nanhui siltation engineering located in the Yangtze River estuary, this paper studies the wave characteristics of the section of hollow tetrahedron siltation embankment by physical model test. Test results show that: 1) The porosity of embankment is about 66%, when the weight of each hollow tetrahedron is 3 t; 2) The reduction rate of wave energy increases linearly with the increase of embankment height, and the increasing rate of the reduction rate of wave height is averagely 4 times faster than that of wave length with the increase of embankment height; 3) Compared with traditional siltation embankment which is composed of riprap and armor block, the hollow tetrahedron siltation embankment has many advantages such as significantly reducing the ground forces from the dike, simplifying construction and repair work, a strong ability to survive under strong storm action and reuse; 4) A critical stable cross-section shape of hollow tetrahedron siltation embankment under certain conditions is proposed. Under this shape condition, every 100 m of siltation embankment consists of about 3 210 blocks, the wave reduction effect of which is slightly worse than that of traditional siltation embankment at low water levels, while the effect is close to or even significantly better than that of the traditional one at high water levels.

Keywords: permeable siltation embankment; hollow tetrahedron; wave; critical stable cross-section shape; wave reduction effect

收稿日期: 2015-04-02
*基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目 (11231202300)
作者简介: 刘猛 (1983—), 男, 硕士, 副研究员, 从事河口水沙运动及河口航道治理研究。

为了适应滩涂促淤圈围工程向深水低滩^[1]的发展需要,突破传统筑堤技术在深水低滩促淤工程中的应用瓶颈,透空式促淤堤结构^[2-11]越来越受到重视,空心四面块体促淤堤便是其中的重要类型之一。本文以长江口南汇边滩促淤工程波浪条件为依据,选择一种在研究中被推荐的空心四面块体结构(图1)深入开展由其堆砌而成的透空式促淤堤断面波浪特性试验,揭示该类型促淤堤相关特性以及传统的抛石加护面块体促淤堤的差异,为透空式促淤堤的研究及应用提供技术支撑。

1 数据与方法

试验在上海河口海岸科学研究中心长江口整体模型厅波浪水槽中进行。水槽长 100 m、宽 1.0 m、高 1.2 m。水槽的一端配有消浪缓坡,另一端配有大连理工大学研制的推板式造波机(带有二次反射吸收装置),由计算机自动控制产生所要求模拟的波浪要素。该造波系统可根据需要产生规则波和不同谱型的不规则波。

本文研究采用的空心四面块体单质量 3 t,为钢筋混凝土结构,尺寸见图1。块体边长为 2 000 mm,壁厚为 300 mm,头部削脚边长为 300 mm,各侧面法向开孔正三角形边长为 1 050 mm,底面法向开孔正三角形边长为 1 497.72 mm。促淤堤设计堤底高程为 - 2.5 m,堤顶高程为 3.7 m,堤顶宽度为 6.8 m。

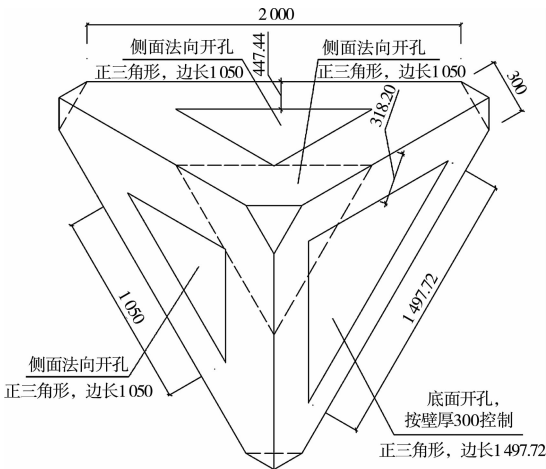


图1 整体平面图(单位:mm)

试验所用波高仪布置见图2,波高仪1用于波要素的率定,其距堤轴线约 10 m,波高仪2用于采集反映消浪效果的波要素,其距堤轴线约 150 m。在分析、评价促淤堤消浪效果时综合考虑 3 个参量,即波高、波长及波能的消减率,其计算公式如下:

$$n_H = \frac{H_1 - H_0}{H_0} \times 100\% \tag{1}$$

$$n_L = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\% \tag{2}$$

$$n_E = \frac{E_1 - E_0}{E_0} \times 100\% \tag{3}$$

式中: n_H 、 n_L 、 n_E 分别为波高、波长及波能的消减率(%); H_0 、 L_0 、 E_0 分别为无促淤堤条件下采集或计算得到的波高、波长及波能; H_1 、 L_1 、 E_1 分别为有促淤堤条件下采集或计算得到的波高、波长及波能,其中波能按下式计算:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 L \tag{4}$$

式中: E 为一个波长范围内的单宽波能; H 为有效波高; L 为有效波长。

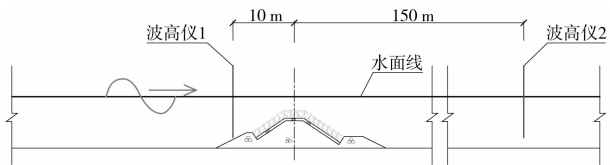


图2 波高仪位置

试验模型几何比尺为 1:20,试验中空心四面块体均采用随机摆放方式,以保证堤身整体的稳定性及更好的消浪效果。试验采用不规则波作为入射波,不规则波的谱型选用 JONSWAP 谱。具体试验要求参照《波浪模型试验规程》。试验波要素见表1,波要素 I、II、III、IV 用于断面稳定性试验;波要素 I、II、III、V 用于消浪效果试验。在波浪作用下,空心四面块体促淤堤的块体累积位移超过单个块体的最大几何尺度一半时即为失稳。

表 1 试验波要素

编号	h/m	$T_{H_{1\%}}/\text{s}$	$H_{13\%}/\text{m}$	$H_{1\%}/\text{m}$	风浪标准
I	8.37	9.83	4.26	5.62	100 a 一遇高潮位(5.87 m) + 100 a 一遇风速(33.5 m/s)
II	7.93	9.09	3.90	5.15	20 a 一遇高潮位(5.43 m) + 100 a 一遇风速(33.5 m/s)
III	5.99	7.80	2.66	3.56	多年平均高潮位(3.49 m) + 100 a 一遇风速(33.5 m/s)
IV	2.73	6.36	1.44	1.94	多年平均低潮位(0.23 m) + 100 a 一遇风速(33.5 m/s)
V	7.48	7.69	3.08	4.16	5 a 一遇高潮位(4.98 m) + 6 级风上限(13.8 m/s)

2 试验结果与分析

2.1 空心四面块体促淤堤临界稳定断面形态及特征

首先在促淤堤断面对称布置条件下开展确定外海侧临界坡度的系列试验，然后在外海侧临界坡度确定的条件下开展确定围堤内侧临界坡度的系列试验，最终确定该空腔式促淤堤断面外海侧及围堤内侧的临界坡度。

确定外海侧临界坡度试验共开展了 3 组，坡度分别为 1:1、1:2、1:3，试验后断面形态见图 3。试验结果表明：1) 当空心四面块体促淤堤断面外海侧及围堤内侧坡度均为 1:1 时，受波要素 I 作用少许时间，迎浪侧出现“塌方”现象，大量块体滚落至堤前，少量滚落至堤后，堤顶高程显著降低，外海侧及围堤内侧坡度均减小；2) 当空心四面块体促淤堤断面外海侧及围堤内侧坡度均为 1:2 时，在各波要素（I ~ IV）作用下，促淤堤断面均保持良好，仅堤前或堤顶表面个别块体出现失稳现象；3) 当空心四面块体促淤堤断面外海侧及围堤内侧坡度均为 1:3 时，在各波要素作用下，促淤堤断面均保持良好，堤身表面仍有个别块体出现失稳现象。根据以上试验结果，确定空心四面块体促淤堤断面外海侧稳定临界坡度为 1:2。



a) 外海侧坡度1:1；围堤内侧坡度1:1



b) 外海侧坡度1:2；围堤内侧坡度1:2



c) 外海侧坡度1:3；围堤内侧坡度1:1

图 3 外海侧临界坡度试验断面形态

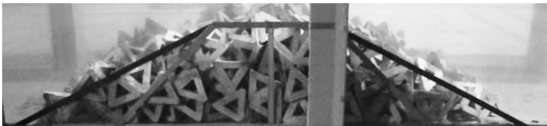
确定围堤内侧临界坡度试验亦共开展了 3 组，坡度分别为 1:1、1:1.5 及 1:2，试验后断面形态见图 4。



a) 外海侧坡度1:2；围堤内侧坡度1:1



b) 外海侧坡度1:2；围堤内侧坡度1:1.5



c) 外海侧坡度1:2；围堤内侧坡度1:2

图 4 围堤内侧临界坡度试验断面形态

试验结果表明：1) 当空心四面块体促淤堤断面围堤内侧坡度为 1:1 时，受波要素 I 作用一段时间后，迎浪侧基本稳定，围堤内侧出现“塌方”现象，较多块体滚落至堤后，堤顶高程略有降低，围堤内侧坡度减小；2) 当空心四面块体促淤堤断面围堤内侧坡度为 1:1.5 时，在各波要素作用下，促淤堤断面均保持良好，仅堤前或堤顶表面个别块体出现失稳现象；3) 当空心四面块体促淤堤断面围堤内侧坡度为 1:2 时，在各波要素作用下，促淤堤断面均保持良好，仅堤前或堤顶表面个别块体出现失稳现象。综合以上试验结果，确定空心

四面块体促淤堤断面临界稳定坡度为外海侧 1:2、围堤内侧 1:1.5。

在促淤堤堤底高程为 -2.5 m、堤顶高程为 3.7 m、堤顶宽度为 6.8 m、外海侧坡度为 1:2 以及围堤内侧坡度为 1:1.5（以下将该断面称为基本断面）条件下，统计了各波要素作用下的表面块体失稳率（表 2）。针对基本断面，在各波要素（Ⅰ~Ⅳ）综合作用后，选择波要素Ⅰ继续作用 9 h（波要素Ⅰ共持续作用 12 h），断面形态仍保持不变，断面稳定。根据基本断面多次摆放试验确定，每 100 m 促淤堤块体数量约为 3 210，堤身孔隙率约 66%。

表 2 各波要素作用下基本断面表面块体失稳率统计		
波要素	失稳块数/块	失稳率/%
波要素Ⅰ	2.3	2.1
波要素Ⅱ	1.3	1.8
波要素Ⅲ	0.3	0.3
波要素Ⅳ	0.0	0.0

在基本断面基础上改变堤身高度（堤顶高程），选择波要素Ⅰ继续开展了一系列（堤身高度分别为 4.2、5.2、6.2、7.2、8.2 m）稳定性试验，堤身断面形状见图 5。各堤身高度条件下，空心四面块体促淤堤表面块体失稳率统计见表 3。试验结果表明：1）当空心四面块体促淤堤外海侧坡度为 1:2 且围堤内侧坡度 1:1.5 时，改变堤顶高程仍能维持堤身断面形态稳定；2）随着堤身高程的增加，表面块体失稳数量有所增加，但失稳率数值较小，均在 3% 以内。

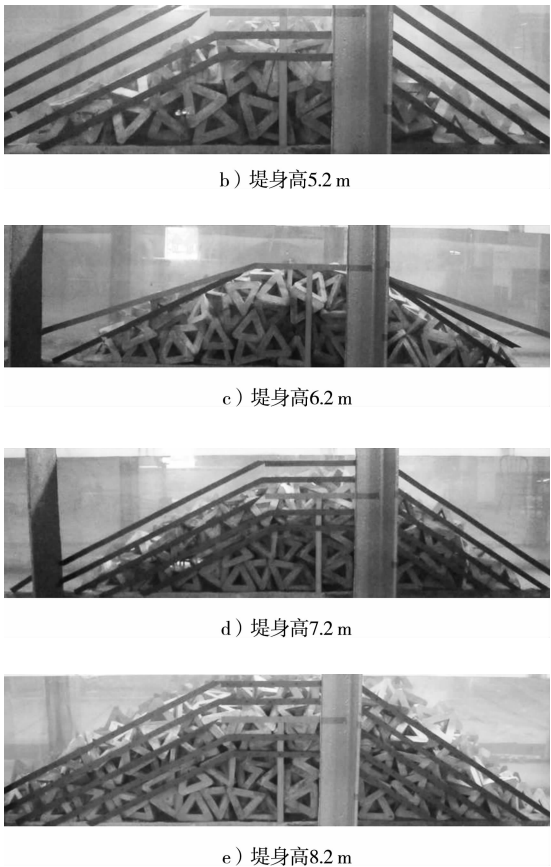
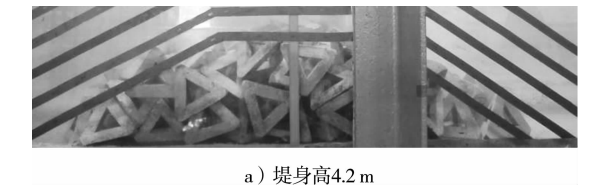


图 5 空心四面块体促淤堤断面

表 3 各堤身高度条件下空心四面块体促淤堤表面块体失稳率统计		
堤身高度/m	失稳块数/块	失稳率/%
4.2	2.0	2.6
5.2	2.3	2.5
6.2	2.3	2.1
7.2	2.7	2.1
8.2	3.3	2.4

2.2 空心四面块体促淤堤消浪特性及变化规律

空心四面块体促淤堤基本断面在各试验波要素作用下的消浪效果统计见表 4，其中在波要素Ⅴ作用下的堤后波高变化频谱分析结果见图 6。

表 4 空心四面块体促淤堤基本断面消浪效果									
潮位	无促淤堤			有促淤堤			消浪效果		
	H_0 /m	T_0 /s	E_0 /kJ	H_1 /m	T_1 /s	E_1 /kJ	n_H /%	n_L /%	n_E /%
平均高潮位	2.4	7.9	527.8	1.2	6.9	110.9	-50.0	-12.5	-79.0
5 a 一遇高潮位	3.1	8.3	923.2	2.0	7.7	359.2	-34.3	-7.7	-61.1
20 a 一遇高潮位	3.5	9.5	1 432.9	2.5	9.4	728.7	-28.3	-0.9	-49.2
100 a 一遇高潮位	3.7	10.3	1 738.5	2.8	10.2	966.2	-25.1	-0.7	-44.4

注：堤身高为 6.2 m。

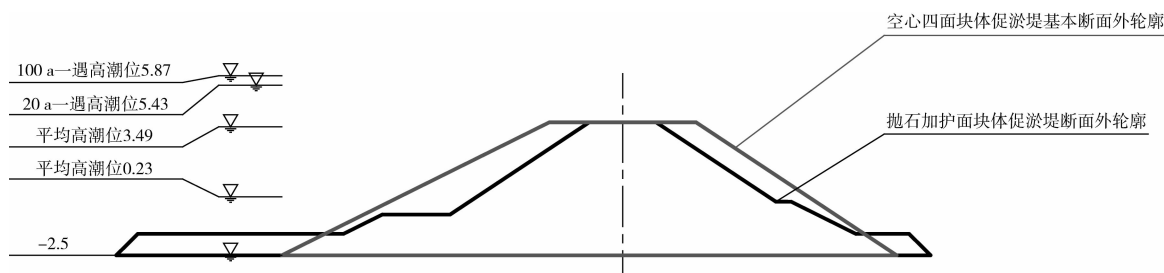


图 10 断面外轮廓对比 (单位: m)

传统的抛石加护面块体促淤堤断面 (图 9) 的消浪效果见表 5。综合表 4 与表 5 数据可见, 与工程已采用的传统的抛石加护面块体促淤堤相比, 空心四面块体促淤堤基本断面消浪特性有以下特点。值得注意的是上述对比是在应用基础上的对

比, 当两种堤型堤顶宽度接近时, 传统的抛石加护面块体促淤堤由于孔隙率显著小其消浪效果较优。按照空心四面块体促淤堤基本断面形态堆砌而成的抛石加护面块体促淤堤 (堤顶宽 6.8 m) 消浪特性见表 5。

表 5 抛石加护面块体促淤堤断面消浪效果

堤身 高/m	堤顶 宽/m	潮位	无促淤堤			有促淤堤			消浪效果		
			H_0 / m	T_0 / s	E_0 / kJ	H_1 / m	T_1 / s	E_1 / kJ	n_H / %	n_L / %	n_E / %
6.2	3.1	平均高潮位	2.4	7.9	527.8	1.0	7.0	82.6	-57.3	-11.2	-84.4
		5 a 一遇高潮位	3.1	8.3	923.2	1.8	7.3	283.6	-40.0	-11.5	-69.3
		20 a 一遇高潮位	3.5	9.5	1 432.9	2.5	9.7	715.0	-30.1	1.8	-50.1
		100 a 一遇高潮位	3.7	10.3	1 738.5	2.9	10.9	1 126.4	-22.4	6.3	-35.2
6.2	6.8	平均高潮位	2.4	7.9	527.8	0.9	7.6	73.5	-61.6	-4.2	-86.1
		20 a 一遇高潮位	3.5	9.5	1 432.9	2.3	8.6	534.9	-35.1	-9.3	-62.7
		100 a 一遇高潮位	3.7	10.3	1 738.5	2.6	9.6	804.3	-29.2	-6.4	-53.7

1) 水位较低时 (平均高潮位和 5 a 一遇高潮位), 空心四面块体促淤堤较传统促淤堤消浪效果略差, 如在平均高潮位的对应波要素作用下, 新型空腔式促淤堤的波能消减率较传统促淤堤降低约 5%。

2) 水位较高时 (20 a 一遇高潮位和 100 a 一遇高潮位), 空心四面块体促淤堤与传统促淤堤消浪效果接近甚至超过传统促淤堤, 如在 100 a 一遇高潮位的对应波要素作用下, 新型空腔式促淤堤的波能消减率较传统促淤堤提高约 10%。

从以上分析可见, 通过选择合适的断面形状, 空心四面块体促淤堤不仅可以满足波浪稳定条件, 而且可以达到甚至超过传统的抛石加护面块体促淤堤消浪效果。因此仅从波浪特性来看, 空心四面块体促淤堤可以替代传统的抛石加护面块体促淤堤。

依据前文试验成果及块体特征可知, 与传统

的抛石加护面块体促淤堤相比, 空心四面块体促淤堤还具有以下明显优势:

1) 堤身对地基压载显著减小。根据材料密度及堤身孔隙率初步估算, 当堤身高度相同时, 空心四面块体促淤堤对地基产生的压载较传统的抛石加护面块体促淤堤减小约 40%。

2) 施工简便。传统的抛石加护面块体促淤堤结构复杂, 施工顺序及精度要求高, 深水作业困难。空心四面块体促淤堤堤身结构均一, 不需要护角, 施工简便, 深水作业优势明显。

3) 强风浪作用下生存力强且修复简便。传统的抛石加护面块体促淤堤在强风浪作用下一旦护面块体失稳剥落, 堤心部分容易遭到淘蚀, 溃堤的可能性大, 且堤身破坏后修复困难。空心四面块体促淤堤堤身结构是均一的, 即使表层块体失稳剥落, 溃堤的可能性小得多, 且堤身破坏后修复简便。

4) 有利于重复利用。相比传统的抛石加护面块体促淤堤, 空心四面块体促淤堤块体回收较为容易且回收率高, 有利于重复利用。

4 结语

1) 仅从波浪特性来看, 通过选择合适的断面形状, 空心四面块体促淤堤可以替代传统的抛石加护面块体促淤堤。

2) 单质量 3 t 的空心四面块体促淤堤在文中波要素条件下, 当堤底高程为 -2.5 m, 堤顶高程为 3.7 m, 堤顶宽度为 6.8 m, 外海侧坡度为 1:2 以及围堤内侧坡度为 1:1.5 时, 其断面达到一种临界稳定, 此时每 100 m 促淤堤块体数量约为 3 210, 且改变堤顶高程仍能维持堤身断面形态稳定。

3) 空心四面块体促淤堤堤身孔隙率约为 66%。

4) 水位较低时, 文中推荐的新型空腔式促淤堤基本断面较实际使用的传统抛石加护面块体促淤堤断面消浪效果略差, 但水位较高时, 其消浪效果接近甚至显著超过传统促淤堤。

5) 从波能的消减率来看, 堤身高度越高消浪效果越好, 波能消减率随着堤身高度增加线性增加; 从波要素变化来看, 堤身高度变化对波高消减显著, 但对波长消减较弱, 波高消减率随堤身高度增加的变大速率较波长消减率平均快 4 倍

以上。

6) 与传统抛石加护面块体促淤堤相比, 空心四面块体促淤堤具有堤身对地基压载显著减小、施工简便、强风浪作用下生存力强且修复简便以及有利于重复利用等优点。

参考文献:

- [1] 茅志昌, 李九发, 吴华林. 上海市滩涂促淤圈围研究[J]. 泥沙研究, 2003(2): 77-81.
- [2] 冯卫兵, 厉佳卉, 曹海锦, 等. 一种新型透空式潜堤消浪促淤特性试验研究[J]. 水运工程, 2014(1): 25-30.
- [3] 郑英, 吴伶, 赵德玉, 等. 四面六边透水框架护滩结构效果水槽试验研究[J]. 水运工程, 2012(11): 127-132.
- [4] 黄东海, 余竞, 陈海英, 等. 四联体螺母块护面结构在横沙东滩促淤圈围工程中的应用[J]. 水运工程, 2010(5): 154-158.
- [5] 赵渭军, 严盛, 宣伟丽, 等. 强潮河口桩式丁坝减冲促淤效果研究[J]. 水动力学研究与进展, 2006(3): 324-330.
- [6] 张为, 李义天, 王秀英, 等. 透水结构促淤试验研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2005(6): 31-37.
- [7] 王国玉, 王永学, 李广伟. 多层水平板透空式防波堤消浪性能试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2005(6): 90-95.
- [8] 严以新, 郑金海, 曾小川. 多层挡板桩基透空式防波堤消浪特性试验研究[J]. 海洋工程, 1998(1): 67-75.

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

二航局中标湖南株洲航电枢纽二线船闸及鱼道工程

2015 年 11 月 5 日, 二航局中标湖南省株洲县航电枢纽二线船闸及鱼道工程 (XJEQ-TJ03 标段), 合同额 5.04 亿元, 工期 32 个月。

此工程位于湖南省株洲县空洲岛, 为 II 级船闸, 主要工程内容包括 2.86 km 船闸防护坡、3 座改建涵闸、2 座灌溉泵站改建等。

工程属于 2015 年新开工的国家重点水运基础设施建设项目, 也是国务院确定的湖南省对接长江经济带的重点建设项目。项目建成后, 将使株洲航电枢纽的年通航能力从 1 260 万 t 升至 2 450 万 t, 对于加快株洲融入长江经济带、完善综合交通运输体系、促进沿江产业布局等均具有重要意义。

(摘编自《中国交通建设网》)