



# 波流共同作用下的航道边坡稳定性研究

刘涛<sup>1</sup>, 陈国平<sup>2</sup>

(1. 上海交通建设总承包有限公司, 上海 200136; 2. 河海大学, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 以国内部分典型港区口外拦门沙段深水航道为研究对象, 分析国内外近岸推移质研究现状。通过断面物理模型试验, 考虑波浪、水流、水深及航道开挖坡度等因素, 研究波流共同作用下沙质海岸推移质运动对航槽边坡稳定的影响, 分析航道开挖边坡的稳定条件, 为工程设计提供参考。

**关键词:** 推移质; 波浪水流; 边坡稳定

中图分类号: U 617.8

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)09-0103-06

## Research on trench slope's stability under wave and current

LIU Tao<sup>1</sup>, CHEN Guo-ping<sup>2</sup>

(1. Shanghai Communications Construction Contracting Co., Ltd., Shanghai 200136, China; 2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** To analyze the state of near-shore bed load research, we take the deepwater ways where the mouth-bar exists in some domestic typical port areas as research objects. Besides, we make the physical modelling experiment and take wave, flow, water depth, the slope of channel excavation and other elements into account, so that we can study the effect of the movement of bed load in sandy coast with the interaction of wave and flow on the stability of the dredge-cut's slope and analyze the condition of its stability, to serve as reference for the design of projects.

**Keywords:** bedload sediment; wave and flow; stability of the dredge-cut's slope

海岸带泥沙运动受波浪、潮汐、海流和径流等动力因素综合作用, 近岸泥沙运动机理及输沙率是海岸工程学研究的重要课题之一。对淤泥质海岸航道与港池淤积问题, 国内外学者进行了大量的研究, 积累了丰富实测资料和科研成果, 并对淤泥质海岸航槽回淤提出了多种形式的计算公式<sup>[1-3]</sup>。目前我国基本解决了淤泥质海岸建港港池航道泥沙严重淤积的难题。同时我国在粉沙质海岸建港方面也取得了突破, 赵冲久等<sup>[4-6]</sup>通过大量的试验和现场观测资料, 基本搞清了粉沙质海岸泥沙运动机理。对于沙质海岸粗颗粒泥沙的研究, 罗肇森<sup>[7-10]</sup>根据水东港等沙质海岸的航道资料建立起了沙质海岸推移质输沙率公式, 此公式在我国的部分沙质海岸得到了很好的验证。国外关于近岸泥沙的研究大都集中在

沙质海滩破碎带内的横向输沙和沿岸输沙<sup>[11-12]</sup>, 对有限水深波浪、潮流联合作用下的输沙率则研究得较少。总之, 海岸带泥沙的输沙机制极为复杂, 进一步研究沙质海岸深水航道回淤问题很有必要。本文以广西铁山港区口外拦门沙段深水航道为研究对象, 通过断面物理模型试验研究波流对泥沙的作用, 探索沙质海岸波流共同作用下的推移质运动对航槽稳定的影响, 具有重要的工程应用价值。

### 1 模型设计与试验方法

物理模型试验在河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室风浪流水槽中进行, 水槽长 80 m、宽 1.0 m、高 1.5 m。水槽一端为不规则波造波机, 底部为循环水系统。

收稿日期: 2014-03-11

作者简介: 刘涛 (1981—), 男, 工程师, 主要从事港口海岸及近海工程施工和研究。

试验采用正态模型，模型比尺  $\lambda_l = \lambda_h = 20$ 。模型沙的选择要求推移质泥沙在波浪作用下的启动相似，最好能兼顾潮流作用下的启动相似。根

据铁山湾港区拦门沙区域原型泥沙特性，模型沙拟用煤粉，中值粒径取为 0.15 mm。原型沙、模型沙启动流速见表 1。

表 1 潮流作用下原型沙、煤粉模型沙启动流速与启动流速比尺

| 滩面高程 | 原型泥沙 |                           |      |      | 模型沙  |                              | 启动流速比尺 $\lambda_{u_c}$ |
|------|------|---------------------------|------|------|------|------------------------------|------------------------|
|      | 水深/m | 启动流速/( $m \cdot s^{-1}$ ) |      |      | 水深/m | 启动流速计算值/( $m \cdot s^{-1}$ ) |                        |
|      |      | 沙莫夫                       | 沙玉清  | 平均值  |      |                              |                        |
| 高滩面  | 3    | 0.41                      | 0.61 | 0.51 | 0.15 | 0.093 ~ 0.145 (0.119)        | 4.3                    |
| 中滩面  | 8    | 0.48                      | 0.74 | 0.61 | 0.40 | 0.109 ~ 0.177 (0.143)        | 4.3                    |
| 低滩面  | 13   | 0.52                      | 0.81 | 0.66 | 0.65 | 0.119 ~ 0.195 (0.157)        | 4.2                    |

波浪作用下原型沙、模型沙启动研究相对较少，试验选用 Manohar 公式<sup>[13]</sup> 计算近底启动流速。波浪作用下泥沙启动流速及其比尺为：1) 原型。  $d_{50} = 0.4 \text{ mm}$ ，  $\rho_s = 2.65 \text{ t/m}^3$ ，近底启动流速  $u_{mc} = 0.55 \text{ m/s}$ 。2) 模型。煤粉  $d_{50} = 0.15 \text{ mm}$ ，  $\rho_s = 1.45 \text{ t/m}^3$ ，近底启动流速  $u_{mc} = 0.12 \text{ m/s}$ ，启动流速相似比尺为 4.6。

上述结果证明选用煤粉模拟天然沙，即使在波浪作用下也基本符合启动流速相似比尺要求。因此模型沙选择在主要满足推移质泥沙波浪作用下启动相似要求的基础上，挑选经水处理过的精制煤粉为模型沙，其密度  $\rho_{sm} = 1.45 \text{ t/m}^3$ ，干密度  $\rho_{0m} = 0.75 \text{ t/m}^3$ 。

对铁山湾深水航道而言，出现波浪相对较大、涌浪频率相对较多的为 S 向和 SSE 向，当横向波浪跨越航道时，波浪流作用下的泥沙输移对航道稳定不利。模型中考虑到对航道稳定最为不利的天然状态，沿波浪水槽的长度方向布置航槽横断面，试验模拟的原型航道底高程为 -17.6 m，航道底宽为 240 m。

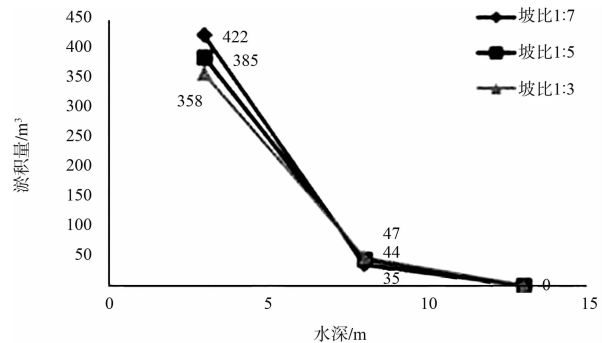
根据铁山港区的特点，结合实验室波浪水槽的条件，选取不同坡比、不同滩面水深、不同流速以及不同波浪条件等因素组成 55 个组次，具体分 3 种坡比 (1:3、1:5、1:7)、3 种滩面高程 (0、-5、-10 m)、2 组流速 (涨落潮平均流速 0.4 m/s，可能最大涨落潮平均流速 0.6 m/s)、3 种波浪条件

(年平均波浪、2 a 一遇作用波浪、50 a 一遇作用波浪)。

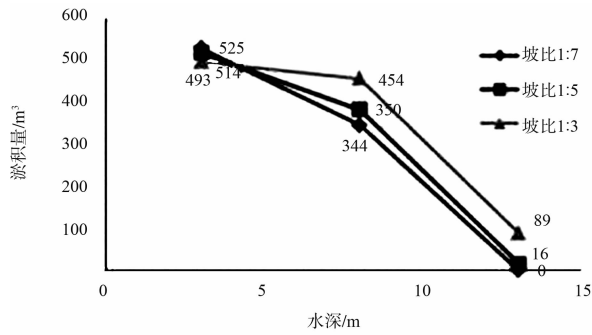
## 2 试验成果分析

### 2.1 滩面水深对航槽泥沙淤积的影响

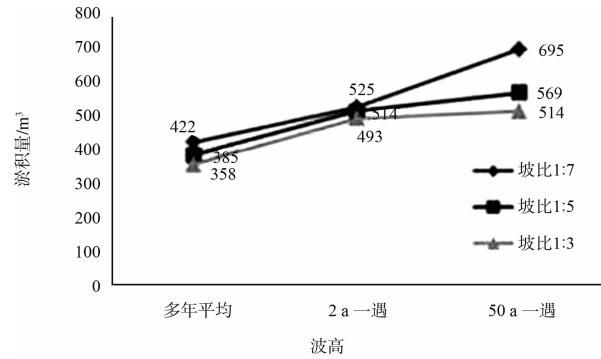
为便于掌握拦门沙段不同滩面高程开挖航槽后的冲淤变化，模型试验设计概化了 -10、-5、0 m 共 3 种滩面典型航槽开挖段，通过断面模型试验研究在同等风浪流动力条件作用下的航槽冲淤变化及稳定形态关系。试验研究表明，在多年平均风浪作用条件下，航槽泥沙淤积量随滩面水深增大发生减小的变化规律非常明显，在水深超过某一值时，泥沙不起动，航槽泥沙淤积量趋于零，见图 1a)；但在滩面水深增大时，又遭遇大风浪作用，波浪充分发展，泥沙输送强烈，大量泥沙淤积到航槽，并首先淤积在航槽边坡，随时间推移逐渐向航道底部淤积。在航槽坡度较陡时，甚至航槽坡度失稳，斜坡滩面泥沙坍塌，大量淤积泥沙被推移淤积在航道底部，见图 1b) 和 1c)。



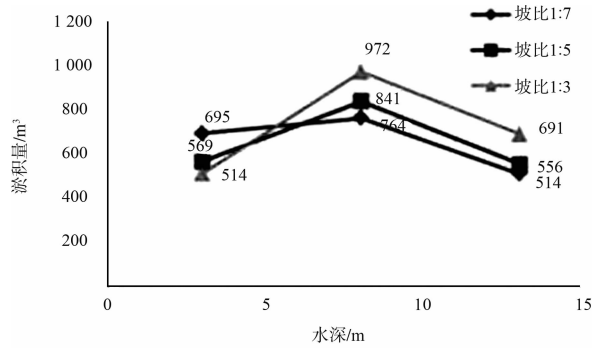
a) 波浪多年平均，流速 0.4 m/s



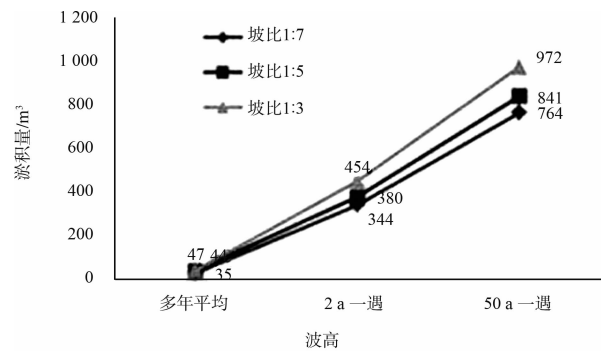
b) 波浪2 a一遇, 流速0.4 m/s



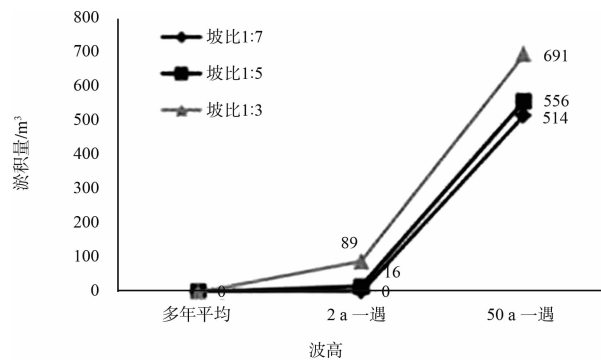
a) 水深3 m, 流速0.4 m/s



c) 波浪50 a一遇, 流速0.4 m/s



b) 水深8 m, 流速0.4 m/s



c) 水深13 m, 流速0.4 m/s

图1 航槽淤积量与水深关系

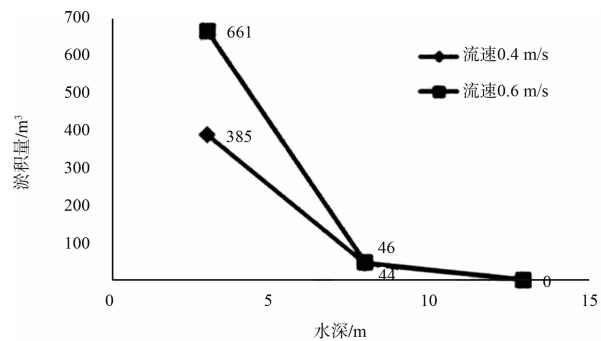
图2 航槽淤积量与设计波浪关系

### 2.2 波浪强度对航槽泥沙淤积的影响

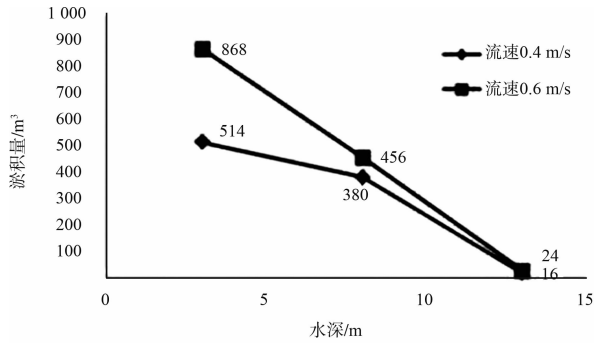
试验表明, 风浪作用小时, 滩面泥沙较为平稳, 航槽泥沙淤积量变化较小; 风浪增大, 航槽泥沙淤积量增大。在滩面水深较小时, 遭遇大风浪作用时, 波浪将发生破碎, 这一变化趋势受到一定抑制, 滩面水深较小时遭遇不同风浪作用的航槽泥沙淤积变化见图 2a); 当滩面水深增大时, 大风浪作用得到充分发展, 滩面泥沙运动异常活跃, 航槽泥沙淤积陡然增加, 航槽泥沙淤积随风浪增大变化规律十分一致, 见图 2b) 和 2c)。

### 2.3 流速对航槽泥沙淤积的影响

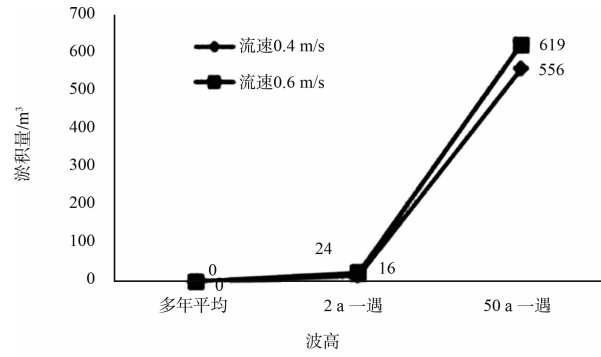
滩面上开挖航槽, 一般来说, 滩面风浪流的综合作用强, 航槽内泥沙淤积量大。试验表明, 潮流作为输送泥沙的主要动力, 潮流流速大则航槽内泥沙淤积量大, 在滩面水深较小时, 潮流输送泥沙的主导作用更趋明显, 见图 3。当滩面水深增大时, 潮流的主导输沙作用逐渐减弱, 见图 4。



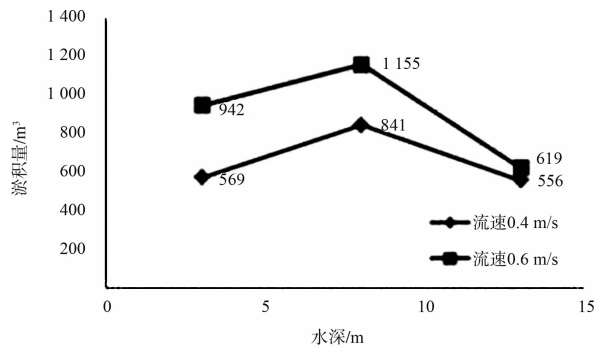
a) 波浪多年平均, 坡比1:5



b) 波浪2 a一遇, 波比1:5

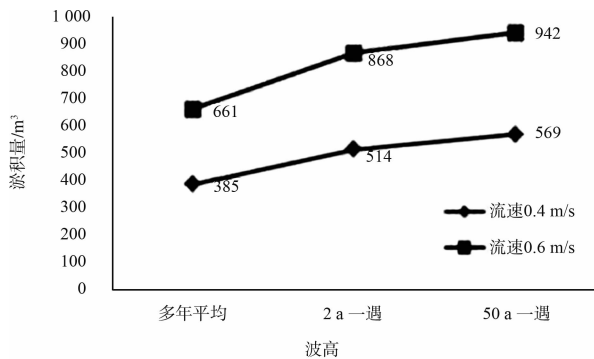


c) 水深13 m, 坡比1:5

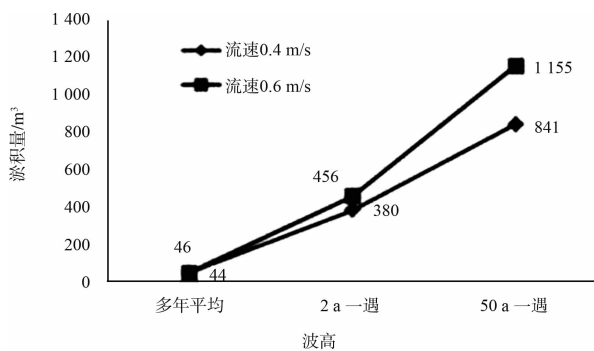


c) 波浪50 a一遇, 波比1:5

图3 不同流速下淤积量与水深关系



a) 水深3 m, 坡比1:5



b) 水深8 m, 坡比1:5

图4 不同流速下淤积量与波浪关系

### 2.4 航槽边坡对泥沙淤积的影响

试验表明,一般滚落淤积航槽内的泥沙不会被潮流输送携带出槽,因此航槽内的泥沙淤积基本与航槽坡度无关,仅与航槽滩面的动力条件有关,在滩面水深增大时,滩面波浪动力条件得以施展,滩面泥沙运动活跃,航槽内泥沙淤积增多。

在研究各因素对淤积量的影响试验过程中,淤积量是在滩面流速 0.4 m/s、滩面水深 3 m、年均风浪作用条件下,模型分别历时 3、6、12、24、48 h 而形成,对应原型航槽分别相当于自然天 3.9、7.8、15.6、31.2、62.4 d。随时间推移回淤速度逐步减小,但未达到平衡。

### 2.5 航槽淤积形态与稳定因素分析

#### 2.5.1 航槽淤积形态

试验现象显示滩面泥沙被推移淤积在边坡上的形态呈向上凸出的三角形,顶面坡度较缓,向河坡度相对较陡,见图 5 和 6。模型试验模拟了多年平均风浪流动力条件下的航槽边坡滩面泥沙淤积形态关系,表明淤积泥沙顶面坡比平均在 11.1 左右,淤积体向河坡比平均在 2.0 左右,随着风浪流作用时间延长,淤积三角形的顶面坡度越来越缓,淤积体向河坡度也越来越陡,见表 3。但在滩面水深不断增大的条件下,大风浪充分发展,滩面泥沙冲刷强烈,航槽边坡上泥沙淤积体增大,三角形顶面和向河坡面淤积体影响长度均有所加长,坡度减缓,见表 4。



图5 滩面水深3 m、潮流速0.4 m/s、年均风浪, 航槽边坡1:5时泥沙淤积状况



图6 滩面水深8 m、潮流速0.4 m/s、2 a一遇风浪, 航槽边坡1:3时泥沙淤积状况

表3 航槽边坡泥沙淤积体形态随作用时间变化关系

| 滩面流速/(m·s <sup>-1</sup> ) | 滩面水深/m | 风浪   | 航槽边坡 | 作用时间 |      | 淤积三角形                      |                            |
|---------------------------|--------|------|------|------|------|----------------------------|----------------------------|
|                           |        |      |      | 模型/h | 原型/d | 顶面坡比 <i>i</i> <sub>1</sub> | 向河坡比 <i>i</i> <sub>2</sub> |
| 0.4                       | 3      | 多年平均 | 1:5  | 6    | 7.8  | 6.58                       | 2.12                       |
| 0.4                       | 3      | 多年平均 | 1:5  | 12   | 15.6 | 9.09                       | 2.23                       |
| 0.4                       | 3      | 多年平均 | 1:3  | 24   | 31.2 | 10.46                      | 1.78                       |
| 0.4                       | 3      | 多年平均 | 1:3  | 48   | 62.4 | 18.29                      | 1.66                       |

表4 航槽边坡1:3断面在大风浪条件下泥沙淤积体形态变化

| 滩面平均流速/(m·s <sup>-1</sup> ) | 滩面风浪条件 | 滩面水深/m | 边坡泥沙淤积三角形                  |                            |
|-----------------------------|--------|--------|----------------------------|----------------------------|
|                             |        |        | 顶面坡比 <i>i</i> <sub>1</sub> | 向河坡比 <i>i</i> <sub>2</sub> |
| 0.4                         | 50 a一遇 | 3      | 5.65                       | 2.43                       |
| 0.4                         | 50 a一遇 | 8      | 8.55                       | 3.97                       |
| 0.4                         | 50 a一遇 | 13     | 12.50                      | 5.56                       |

当滩面推移泥沙淤积到航道底宽时, 将需要采取维护航道尺度的工程措施, 否则将影响到进出口门航道运行船舶的安全航行。因此将滩面泥沙推移淤积到航槽边坡而不影响航道底宽时作为自然维护航道有效尺度的临界条件, 即开挖航槽边坡稳定的有效时间。试验显示: 航槽边坡较陡, 航槽边坡长度较短, 基建性航槽的工程量较省, 但航槽边坡容许淤积泥沙的时间较短, 航槽边坡稳定性较差; 航槽边坡较缓, 航槽边坡长度相对较长, 基建性航槽的工程量较多, 但航槽边坡容许淤积泥沙的时间将会较长, 航槽边坡稳定性较好。

### 2.5.2 航槽稳定边坡条件分析

试验显示, 输移的泥沙总是先淤积在航槽边坡, 随后向航槽底部淤积推进, 进而影响到设计航槽的有效宽度, 但由于未破坏原设计航道边坡,

所以航槽边坡是稳定的。即使风浪流动力条件较强, 滩面泥沙起冲刷导致边坡有所降低, 但原设计航槽边坡未被冲刷破坏, 航槽边坡也尚属稳定。只有当风浪流作用特别强大时, 不仅冲刷滩面泥沙, 而且冲刷破坏航槽设计边坡坡顶, 使得航槽边坡上泥沙淤积的坡面缓于原设计航槽坡度, 此时原设计航槽坡度便受到破坏, 航槽边坡得不到稳定。定义航槽边坡上泥沙淤积坡度与设计航槽坡度之比为航槽边坡稳定性指标, 当航槽边坡泥沙淤积泥面坡度小于设计航槽坡度时, 表示航槽边坡稳定性差; 当航槽边坡泥沙淤积前沿坡度大于或等于设计航槽坡度时, 表示航槽边坡稳定。即

$$\psi_i = \frac{i}{i_0} \quad (1)$$

式中:  $\psi_i$  为航槽边坡稳定性指标, 大于等于1边坡稳定, 小于1则航槽边坡不稳定;  $i$  为航槽泥沙淤积坡度;  $i_0$  为设计航槽坡度。

经计算和模型测定, 发现在滩面水深8 m或13 m遭遇50 a一遇风浪时, 航槽边坡1:3的边坡将遭受破坏, 边坡不稳定, 其它设计航槽边坡1:7或1:5时基本均属稳定, 见表5。

表 5 航槽边坡稳定性

| 边 坡 | 滩面 水深/m | 年均 风浪 | 2 a 一遇风浪 | 50 a 一遇风浪 | 说明   |
|-----|---------|-------|----------|-----------|--|
| 1:7 | 3       | 稳定    | 稳定       | 稳定        |  |
|     | 8       | 稳定    | 稳定       | 稳定        |  |
|     | 13      | 稳定    | 稳定       | 稳定        |  |
| 1:5 | 3       | 稳定    | 稳定       | 稳定        | 2 a 或 50 a 一遇风浪时,滩面有所冲刷降低                              |
|     | 8       | 稳定    | 稳定       | 欠稳定       | 2 a 或 50 a 一遇风浪时,滩面有所冲刷降低;滩面流速 0.6 m/s 及 50 a 一遇风浪时不稳定 |
|     | 13      | 稳定    | 稳定       | 欠稳定       | 50 a 一遇风浪时,滩面有所冲刷降低;滩面流速 0.6 m/s 及 50 a 一遇风浪时不稳定       |
| 1:3 | 3       | 稳定    | 稳定       | 稳定        | 年均、2 a 或 50 a 一遇风浪时,滩面有所冲刷降低                           |
|     | 8       | 稳定    | 稳定       | 不稳定       | 2 a 或 50 a 一遇风浪时,滩面有所冲刷降低                              |
|     | 13      | 稳定    | 稳定       | 不稳定       | 50 a 一遇风浪时,滩面有所冲刷降低                                    |

3 结 语

1) 沙质海岸航槽泥沙淤积主要与滩面水深、滩面流速、滩面波浪等动力条件有关,与航槽开挖坡度无关。一般来说,滩面水深较小,开挖航道后泥沙淤积较大;滩面水深越大,开挖航道后泥沙淤积越小。但当滩面水深增大、遭遇稀遇大风浪时,波浪充分发展,航槽内泥沙淤积将突然增大,需引起足够的重视。

2) 沙质海岸拦门沙段开挖航槽,由于潮流波浪等动力条件的改变,航槽内将产生推移质泥沙淤积。在潮流波浪垂直作用于航槽时,泥沙淤积将以航槽边坡为底边的三角形形式向前淤积推进,当航槽边坡淤积的泥沙超过容许的淤积量,泥沙淤积将影响到航槽的底部,影响到航槽的有效尺度。

3) 沙质海岸航槽坡度采用 1:7、1:5 或 1:3 时,在常遇风浪流条件下,都可以维持航槽边坡的稳定;在航槽边坡 1:7 和 1:5,遭遇 2 a 一遇或 50 a 一遇风浪时,基本上可以维持航槽边坡的稳定;

但当航槽坡度 1:3,滩面水深 8 m 以上时,遭遇 50 a 一遇风浪航槽迎流迎浪向和背流背浪向坡角均发生坍塌,不能维持航槽稳定。

4) 本模型试验的成果与铁山港 5 万吨级航道实测回淤量比较,具有较好的一致性,后阶段将对波浪作用下推移质输沙率系数选取与公式的拟合及确定作进一步研究。

参 考 文 献:

- [1] 罗肇森. 河口航道开挖后的回淤计算[J]. 泥沙研究, 1987(2): 13-19.
- [2] 刘家驹. 淤泥质海岸航道、港池淤积计算方法及其推广应用[J]. 水利水运科学研究, 1993(4): 301-320.
- [3] 赵晓冬, 陈志昌. 河口航道航槽水力学研究及回淤计算[C]//两岸港口及海岸开发研讨会论文集. 南京: 河海大学出版社, 1993: 311-317.
- [4] 赵冲久. 波浪作用下粉沙质底沙运动特性的试验研究[J]. 水道港口, 1994(1): 34-39.
- [5] 赵冲久, 刘富强, 曹祖德. 粉沙质海岸泥沙运动特点的试验研究[J]. 水道港口, 2002(4): 259-261.
- [6] 徐宏明, 杨树森. 粉沙质海岸港口防沙减淤措施研究[R]. 天津: 交通部天津水运工程科学研究所, 2002.
- [7] 罗肇森. 潮汐通道口拦门沙航道上的淤积计算[J]. 海洋工程, 1992, 10(2): 32-40.
- [8] 罗肇森. 水东湾的建港条件及拦门沙航道的开发研究与实践[J]. 水利水运科学研究, 1993(1): 1-11.
- [9] 罗肇森. 波、流共同作用下近底泥沙输移及航道淤积预报[J]. 泥沙研究, 2004(6): 1-9.
- [10] 罗肇森. 风、浪、流共同作用下的泥沙输移[J]. 水利水运工程学报, 2004(3): 1-6.
- [11] Madsen O S, Grant W D. Sediment transport in the coastal environment[R]. USA: Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1976.
- [12] Bijker E W. Longshore transport computations[J]. Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, 1971, 97(4): 687-701.
- [13] Manohar M. Mechanics of bottom sediment movement due to wave action[R]. USA: California univ berkeley wave research lab, 1955.

( 本 文 编 辑 武 亚 庆 )