

文章编号:0559-9350(2000)01-0049-05

# 波浪掀沙的动力学机理分析

曹文洪<sup>1</sup> 刘青泉<sup>2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要:** 本文从床面附近泥沙颗粒的运动特征出发, 详细分析波浪作用下床面泥沙扬起的动力学机制, 得到了波浪掀沙计算公式, 计算结果与实测资料相吻合。研究表明淤泥质海岸泥沙颗粒的稳定性主要受制于颗粒间的粘结力和薄膜水压力, 重力作用则居于次要地位, 因此泥沙颗粒越细越难以起悬。

**关键词:** 泥沙颗粒; 波浪掀沙; 动力学; 机理

**中图分类号:** TV148.5

**文献标识码:** A

波浪掀沙是河口海岸泥沙问题中极为重要和引入瞩目的课题, 多年来不少学者对此作了一定的探讨, 但由于波浪作用下床面附近的泥沙运动十分复杂, 加之无论室内试验还是野外观测都比较困难, 致使该问题一直没能得到较好的解决。有鉴于此, 进一步加强对泥沙颗粒扬动的力学特性研究, 有助于对波浪掀沙机理的认识。

## 1 泥沙颗粒的扬动模式

已有的研究表明, 床面上的泥沙颗粒在垂直方向上受到大于沙粒水下重力、粒间粘结力和薄膜水附加压力等的上扬动力后, 沙粒就会扬起。沙粒从床面跃起时需要一定的初始速度, 显然是在较短的时间内通过动量转化而具有的。这种转化可以从以下三种途径获得: (1) 沙粒作跃移运动, 在获得了水流传给动量后, 在跃落在床面时, 与床面发生碰撞, 在很短的碰撞瞬间, 跃起的沙粒获得了较大的动量。(2) 由于床面的不平整, 水流发生局部分离, 将泥沙卷起, 使泥沙在较短时间内获得较大的动量。(3) 床面附近的紊动猝发, 带动泥沙颗粒, 迅速传递给沙粒较大的动量。

由此, 我们将泥沙颗粒的扬起过程概括为以下三种途径和模式<sup>[1]</sup>:

· 沙粒通过跃移运动获得较大的动量, 并在跃移上升的过程中, 被大尺度的紊动水团挟带呈悬浮状态。

· 对于不平整床面, 由于水流在床面附近产生局部分离, 将沙粒卷起, 沙粒获得充分动量, 在卷起的过程中, 进一步被主流区的大尺度紊动水团挟带悬浮。

· 近壁床面上水流的紊动猝发, 被低速水团挟带的泥沙在上升过程中, 又不断从主流区的大尺度紊动水团中获取新的动量, 从而继续地呈悬浮状态。

**扬动模式** 表明泥沙颗粒的跃移运动是泥沙运动的一个重要形式, 泥沙颗粒由推移运动转入悬移运动一般都要经过跃移运动这一过程。胡春宏<sup>[2]</sup>曾用高速摄影技术观测了这一过程。

**扬动模式** 和**扬动模式** 通常可以使床面泥沙不经跃移过程, 甚至直接从静止状态转为悬移运动。显然**扬动模式** 特别是**扬动模式** 更易于解释淤泥质河口海岸地区泥沙在波浪的作用下一经起动立即进入悬浮状态的现象。

收稿日期: 1999-05-10

作者简介: 曹文洪 (1963—), 满族, 黑龙江省, 高级工程师。

## 2 波浪掀沙的动力学分析

对于浅水波 ( $h/L < 0.5$ ), 近底水质点可产生周期性的往复运动 (图 1), 从而可能引起海底泥沙运动. 根据线性理论, 在有限水深情况下, 其水质点波动速度可由下式表示:

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{H}{T} \frac{\cosh[k(z+h)]}{\sinh kh} \cos(kx - t) \\ v &= \frac{H}{T} \frac{\sinh[k(z+h)]}{\sinh kh} \sin(kx - t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中,  $u$ 、 $v$  分别代表波动水质点的水平速度和垂直速度;  $z$ 、 $x$  和  $t$  分别代表垂直坐标 (水面为 0, 向下为负)、水平坐标和时间;  $k = \frac{2\pi}{L}$ ,  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ .

对泥沙颗粒由床面扬起的过 程, 主要关心的是沙粒的垂向受力. 在波动水流中的垂向受力可归纳如下几个力的作用:

(1) 水下颗粒的有效重力

$$W = \gamma_1 (s - \gamma) d^3 \quad (2)$$

式中,  $\gamma_1$  为沙粒的体积系数.

(2) 上举力

$$F_L = C_L \gamma_2 d^2 \frac{u_{z-h}^2}{2g} \quad (3)$$

式中,  $C_L$  为上举力系数;  $\gamma_2$  为铅直方向的沙粒面积系数.

在床面, 即  $z = -h$ , 则式 (1) 为:

$$\left. \begin{aligned} u_{z-h} &= \frac{H}{T \sinh kh} \cos(kx - t) \\ v_{z-h} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (3) 得:

$$F_L = \frac{C_L \gamma_2 d^2}{2} \frac{H^2}{T^2 \sinh^2 kh} \cos^2(kx - t) \quad (5)$$

(3) 脉动上举力

考虑到水流的紊动作用, 将水流对泥沙的垂向作用分为两部分, 即除了上述上举力外, 另一部分为脉动上举力, 参照时均上举力的表达式将其表示为:

$$F_L = C_L \gamma_2 d^2 \frac{(v_{z-h})^2}{2g} \quad (6)$$

式中,  $v_{z-h}$  为底部垂向脉动流速.

在这里引入刘家驹<sup>[3]</sup>求得的波动水体的平均垂向脉动速度:

$$| \bar{v}_{z-h} | = bH \left( \frac{g}{h} \right)^{\frac{1}{2}} \left[ 1 + \frac{b_0}{b} \left( \frac{h}{g} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\sinh^2 k(h+z)}{\sinh^2 kh} \right] \quad (7)$$

式中,  $b_0$ 、 $b$  为待定系数;  $H$  为波陡.

式 (7) 表明在波浪的作用下, 垂向脉动速度并不服从正态分布, 这与明渠水流垂向脉动流速呈正态分布不一样.

在床面上,  $z = -h$  时

$$| \bar{v}_{z-h} | = bH \left( \frac{g}{h} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

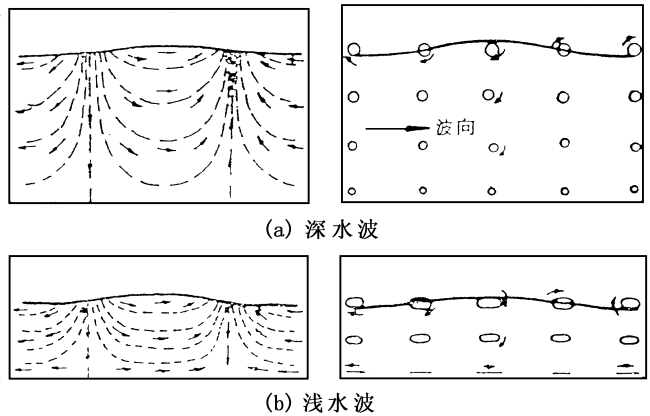


图 1 振荡波水质点的运动轨迹

可见，底部垂向平均脉动压力与波高成正比，与水深成反比。

用  $\overline{v - h}$  代替  $v - h$ ，将式 (8) 代入式 (6) 得：

$$F_L = C_L \cdot 2b^2 \frac{H^2 d^2}{2h} \quad (9)$$

#### (4) 粘结力与薄膜水附加压力

细颗粒之间由于粘结力的存在，使颗粒成结合状态。对于由静止起悬的细颗粒，必须克服颗粒间粘结力和薄膜水附加压力，使颗粒松动后才有可能悬浮。也就是说，细颗粒泥沙由静止起悬应同时满足松动条件和悬浮条件。

薄膜水附加压力<sup>[4]</sup>：

$$N_1 = h \frac{\overline{d}}{2} \quad (10)$$

式中， $\overline{d}$  为与沙粒缝隙大小有关的特征厚度； $\overline{d}$  为修正系数， $\overline{d} = \frac{1}{16}$ 。

颗粒间的粘结力<sup>[4]</sup>：

$$N_2 = \frac{\overline{d}}{2} d \quad (11)$$

式中， $\overline{d}$  为粘结力系数，其因次为  $[FL/L^2]$ ， $k = \overline{d} / d$ 。根据交叉石英丝试验成果定为  $\overline{d} = 0.213 \times 10^{-4} \text{cm}$ ， $k = 2.56 \text{cm/s}^2$ 。

综上所述，波浪作用下细颗粒泥沙在床面上由静起悬时的条件应为：

$$F_L + F_L = W + N_1 + N_2 \quad (12)$$

在临界条件下：

$$F_L + F_L = W + N_1 + N_2 \quad (13)$$

从沙粒的受力情况分析，最大上举力的相位为  $kx - t = 0$ ，在此情况下，将式 (2)、(5)、(9)、(10) 和式 (11) 代入式 (13) 中，可以解得泥沙起悬时的临界波高  $H_s$ ，即

$$H_s = \frac{\sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{\overline{d}}{2} \right)^2 d^2 + \frac{1}{2} (h + k/g)}}{\sqrt{C_L \cdot 2d \left( \frac{1}{2gT^2 \sinh^2 kh} + \frac{b^2}{2h} \right)}} \quad (14)$$

将泥沙颗粒看成椭球体，取其三轴与同体积球体直径之比分别为 4/3、3/3、2/3，据此，沙粒的体积系数  $\alpha_1 = \frac{1}{6}$ ，铅直方向面积系数  $\alpha_2 = \frac{1}{4} \times \frac{3}{3} \times \frac{4}{3} = \frac{1}{3}$ 。将上述参数代入式 (14) 整理后得：

$$H_s = \frac{\sqrt{0.5 \left( \frac{\overline{d}}{2} \right)^2 d^2 + 0.094 (h + k/g)}}{\sqrt{C_L d \left( \frac{1}{gT^2 \sinh^2 kh} + \frac{b^2}{h} \right)}} \quad (15)$$

$H_s$  即是床面泥沙扬动时的临界波高，式 (15) 中  $C_L$  和  $b$  为待定系数。

令  $C_L = 1/\sqrt{C_L}$ ，则式 (15) 可以写为：

$$H_s = C_L \frac{\sqrt{0.5 \left( \frac{\overline{d}}{2} \right)^2 d^2 + 0.094 (h + k/g)}}{\sqrt{d \left( \frac{1}{gT^2 \sinh^2 kh} + \frac{b^2}{h} \right)}} \quad (16)$$

### 3 公式的检验

对于公式 (15) 中的系数  $b$ ，刘家驹<sup>[3]</sup>在推导波动水体的平均垂向脉动速度时认为是定常系数。公式 (15) 中的上举力系数  $C_L$  的影响机理比较复杂，到目前并未得到很好地解决。通过对浅水波水

质点在床面的运动特性分析，假定  $C_L$  或  $C_L$  为水深  $h$  和波长  $L$  的函数，即

$$C_L = f(h, L) \quad (17)$$

采用 Bagnold<sup>[5]</sup>水槽实测资料（试验用沙的特性如表 1 所示）分析确定式（16）中的系数  $C_L$  和  $b$ ，得到如下结果：

$$\begin{cases} C_L = 4.684(L/h)^{0.322} \\ b = 0.241 \end{cases} \quad (18)$$

将式（18）代入式（16）可以得到波浪作用下床面泥沙扬动时的临界高计算公式：

$$H_s = 4.684(L/h)^{0.322} \frac{0.5 \left( \frac{s}{\rho} \right) d^2 + 0.094(h + k/g)}{d \left( \frac{2}{gT^2 \sinh^2 kh} + \frac{0.0581}{h} \right)} \quad (19)$$

试验沙	比重 (g/cm <sup>3</sup> )	粒径 (cm)
钢粒	7.9	0.060
天然沙	2.65	0.330
天然沙	2.65	0.080
天然沙	2.65	0.036
天然沙	2.65	0.016
天然沙	2.65	0.009
煤	1.30	0.800
煤	1.30	0.250
煤	1.30	0.036

确定系数  $C_L$  和  $b$  时，临界波高计算值与实测值的比较如图 2 所示。

为检验式（19）计算波浪作用下临界波高的可靠性，采用 John R. Dinger<sup>[6]</sup>的水槽试验资料进行检验。John R. Dinger 在 100cm 的水深条件下，床面分别铺设 0.017cm 和 0.031cm 的天然沙，在周期为 2~10 秒的波浪作用下，观测床面泥沙被掀起时临界波高值。图 3 给出了式（19）计算值和 John R. Dinger 实测值的比较，结果符合良好，表明式（19）基本反映了波浪掀沙的基本规律。

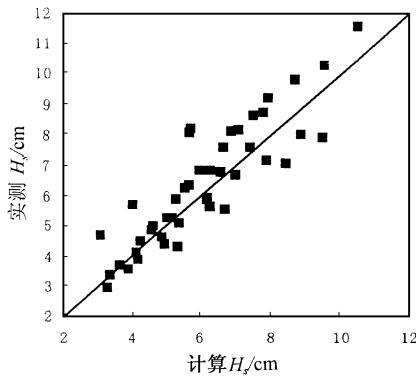


图 2 式（19）计算值与 Bagnold 试验值比较

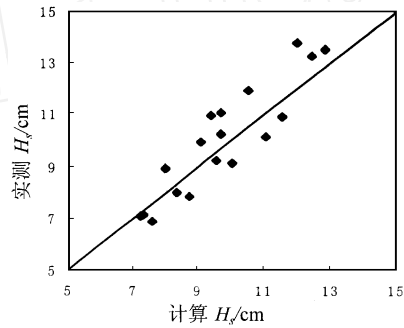


图 3 式（19）计算值与 Dinger 试验值比较

#### 4 黄河口海岸波浪掀沙计算

由于受野外复杂条件和观测手段的限制，对波浪掀沙机理的观测研究多限于室内水槽试验。因此，利用公式对实际河口海岸进行计算，并能得到一些定性的和规律性的认识是非常有实际意义的。黄河河口海岸地区的波浪以北东向为主，平均周期 4.2~5.6s，平均波长 27.7~49.2m，床面泥沙粒径范围在 0.005~0.08mm。根据公式（19）可以计算出黄河河口海岸地区的临界波高与水深及床沙中值粒径的关系（图 4）。可见由于黄河口近岸海区泥沙颗粒比较细，颗粒的稳定性主要受制于颗粒间的粘结力和薄膜水压力，重力作用则居于次要地位，因此泥沙颗粒越细越难以起悬。黄河口近岸海区北东向波浪的有效波高一般为 1.2m~2.5m 之间，由图 4 可知，北东向波浪可以掀起 6~8m 水深以内的床面泥沙，在非常强的波浪作用下（波高大于 3m），10m 左右水深以下的床面泥沙也可被掀起。图 5 为 1983 年 9 月 18 日和 27 日

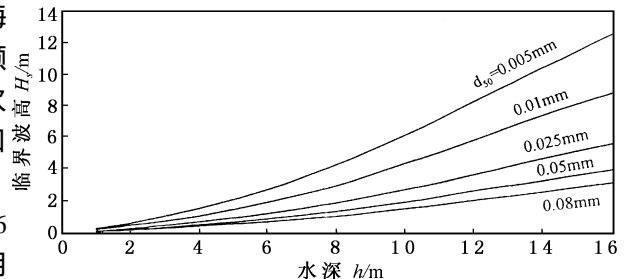


图 4 临界波高与水深及床面泥沙中值粒径的关系

东北风速分别是  $8\text{m/s}$  和  $17\text{m/s}$  时黄河口附近海域含沙量过程线，观测水深范围为  $2\sim 7\text{m}$ ，通过与无风天气含沙量过程相比，可见这两日的东北风可以掀起  $7\text{m}$  以内的床面泥沙。图 6 为钓口河流路附近海域典型断面 1975~1988 年断面冲淤变化情况。黄河 1976 年改走清水沟流路以后，钓口河流路附近海岸基本在波浪和潮流作用下侵蚀后退，通过 1983 年和 1988 年实测断面与 1975 年实测断面的比较可见， $10\sim 12\text{m}$  水深以下的床面发生了侵蚀。由此可见，式 (19) 的计算结果可以解释黄河河口海岸地区波浪掀沙的特点。

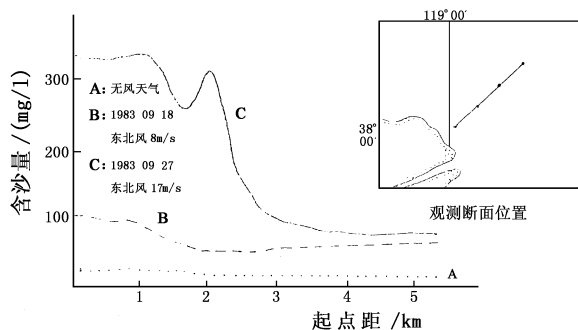


图 5 黄河口附近海域的不同天气情况下悬沙观测值

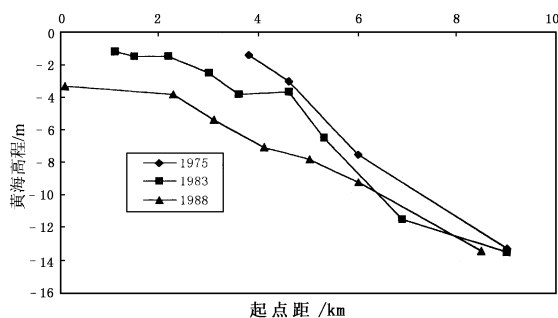


图 6 钓口河流路附近海域实测断面 (断面 11#)

## 5 结语

(1) 从泥沙扬动的角度对波浪掀沙的动力学机理进行分析，注重波浪作用下脉动上举力对泥沙颗粒上扬的作用，并强调细颗粒泥沙粘结力和薄膜水附加压力的作用，推导得出了泥沙起悬时的临界高计算公式。

(2) 公式 (19) 经水槽试验资料验证符合良好，并对黄河河口海岸波浪掀沙进行了计算。计算结果表明，对于淤泥质河口海岸，由于泥沙颗粒比较细，颗粒的稳定性主要受制于颗粒间的粘结力和薄膜水压力，重力作用则居于次要地位。

(3) 由于波浪掀沙的问题极为复杂，影响因素众多，本文的探讨只是有别于传统的泥沙扩散理论的一个思路，今后还需沿着这条思路做进一步工作。

## 参 考 文 献：

- [1] 刘青泉, 曹文洪. 泥沙颗粒的扬动机理分析 [J]. 水利学报, 1998, (5).
- [2] 胡春宏, 惠遇甲著. 明渠挟沙水流运动的力学和统计规律 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [3] 刘家驹. 波浪作用下泥沙运动研究. 全国泥沙基本理论研究学术讨论会 [C]. 1992.
- [4] 南京水利科学研究所. 三二零工程坝区模型设计 [R]. 1974.
- [5] Bagnold R A. Motions of waves in shallow water: interaction between waves and sand bottoms [C]. Proc. Roy. Soc. London, Series A. 1946, (187), 1—15.
- [6] Dingle John R. The threshold of grain motion under oscillatory flow in a laboratory wave channel [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1979, 49 (1): 0287—0294.

(下转第 59 页)

2.0. 当然, 平板支墩坝横河向的抗震能力往往起控制作用, 限于篇幅, 将另撰文介绍.

致谢 本文研究工作得到古田溪水电厂徐世元高工、福建省电力工业局洪云高工以及河海大学水科所夏颂佑教授和周澄副教授的大力支持与帮助, 在此表示衷心感谢.

#### 参 考 文 献:

- [1] 卓家寿, 姜弘道. 带有夹层岩基的三维弹塑性分析 [J]. 华东水利学院学报, 1979, (2).
- [2] 刘国明, 林义兴, 夏颂佑, 等. 三峡链子崖危岩体静力稳定性有限元分析 [J]. 河海大学学报, 1996, (4).
- [3] 徐连民, 林益才, 夏颂佑. 无限元在坝、水、地基系统动力分析中的应用 [J]. 河海大学学报, 1989, (5).
- [4] 华东水利学院. 弹性力学问题的有限单元法 [M]. 北京: 水利出版社, 1977.
- [5] 姜弘道, 陈和群. 有限单元法的程序设计 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1989.
- [6] 刘国明, 夏颂佑, 林义兴. 三峡链子崖危岩体非线性动力响应分析 [J]. 岩土力学, 1996, (2).
- [7] 中华人民共和国水利部. 水工建筑物抗震设计规范 (SL203-97) [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.

### Seismic sliding stability analysis of a flat-slab buttress dam

LIU Guoming<sup>1</sup>

(1. Fuzhou University, Fuzhou 350002)

**Abstract** Seismic sliding stability of the Gutianxi third cascade buttress dam is studied with 3-D non-linear FEM in this paper. The contact non-linearity between the dam and its foundation is simulated. The rock and concrete are assumed to be linearly elastic and the infinite area of water body and foundation are simulated with infinite elements. The sliding factor is obtained with static analysis method and the relevant FEM program is developed. By using this program, the variation of sliding factor of the dam with time under longitudinal earthquake motion is attained.

**Key words** Buttress dam; seismic sliding stability; nonlinear FEM; contact.

---

(上接第 53 页)

### Analysis on Dynamic mechanism of sediment winnowing caused by wave

CAO Wenhong<sup>1</sup>, LIU Qingquan<sup>2</sup>

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044;

2. Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing 100080)

**Abstract** In this paper, a systematic study on dynamic mechanism of sediment particles being winnowed from seabed by wave action is carried out. An equation for sediment winnowing caused by wave is established. The calculated results are in good agreement with the measured data in the Yellow River estuary.

**Key words** sediment particle; sediment winnowing; wave action; dynamic mechanism.