

## 波浪作用下太湖底泥试验及航道回淤分析\*

周益人<sup>1</sup> 肖惠兴<sup>2</sup> 潘军宁<sup>1</sup> 张金善<sup>1</sup>

(1: 南京水利科学研究院河港研究所, 南京 210024; 2: 江苏省交通厅, 南京 210001)

**提 要** 波浪作用下泥沙的起动和输移研究对航道回淤分析具有重要意义。以往这类研究主要针对海岸地区的非粘性沙, 而对于单纯波浪或以波浪为主要动力的粘性泥沙运动, 特别是湖区底泥的研究相对较少。本文通过波浪水槽试验对太湖底泥的起动和输移进行了研究, 并提出波浪动力下含沙量经验公式, 由此对太湖地区某具体工程的航道回淤进行分析计算。该成果对研究波浪作用下淤泥的输移及太湖地区类似的航道回淤问题具有借鉴意义。

**关键词** 波浪 太湖底泥 起动 输移 航道回淤

**分类号** P343.3

随着苏南地区国民经济的迅猛发展, 当地对水运建设的需求不断增长。江苏省交通部门拟开发建设芜申线四级航道, 自安徽芜湖经高淳、溧阳、宜兴入太湖, 穿越太湖后, 再由吴江出太湖至上海。为了配合该航道工程可行性研究, 要求通过数学模型计算, 得到太湖内工程区的风成浪和风成流数据, 然后根据太湖底泥运动规律, 分析计算太湖湖区航道年回淤量。

数学模型计算结果表明: 太湖湖面风力较强, 由此产生的波浪波高较大, 而水流流速较小, 一般不大于 0.10m/s, 引起太湖底床泥沙悬浮的主要动力是风成浪, 水流对水体含沙量的影响较小, 只是起到传输泥沙的作用, 属于典型的“波浪掀沙, 水流输沙”状况。目前, 尽管国内外对波浪作用下泥沙运动的研究成果较多<sup>[1,2]</sup>, 但大多是针对海岸地区的非粘性沙, 而对于单纯波浪或以波浪为主要动力的粘性泥沙运动, 特别是湖区底泥的研究相对较少。从现有的太湖实测泥沙资料可见, 太湖底表层泥沙为粉土, 中值粒径在 0.01-0.027mm 之间, 属粘性细颗粒泥沙范畴<sup>[3]</sup>, 其在波浪作用下的运动非常复杂, 尚无成熟经验可供借鉴, 因此, 在对太湖地区航道回淤进行分析时, 首先应研究其在波浪作用下的运动规律。本文通过对太湖底泥的波浪水槽试验, 提出波浪动力下含沙量经验公式, 在此基础上对具体工程的航道回淤进行分析计算, 为科学决策提供依据。

### 1 试验条件

#### 1.1 试验设备

本次试验在波浪水槽中进行。水槽长 50m, 宽 0.7m, 高 1.0m, 玻璃观测段长约 30m。水

\* 2003-03-16 收稿; 2003-06-10 收修改稿。周益人, 男, 1964 年生, 博士研究生, 高级工程师, E-mail: zhouyiren21@sina.com.cn

槽一端装有推板式造波机, 可产生波高 3-22cm, 周期 0.8-2.0s 的波浪, 另一端设置 1:10 的消浪缓坡 (图 1)。

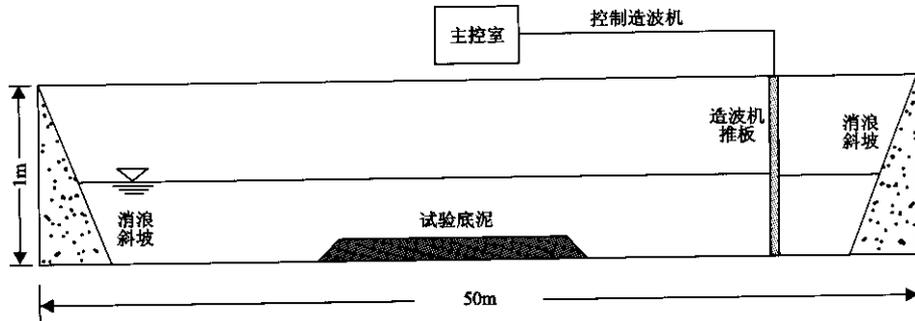


图 1 波浪水槽示意图

Fig. 1 Layout of wave flume

试验过程中, 波高和周期值用 MTS 公司生产的电容式波高仪采集, 由计算机分析处理。输沙量测量采用光电测沙仪监测, 并用虹吸管采样, 经比重瓶法率定。

由于太湖底床表层泥沙特性变化不大, 本次试验只取一种现场土样作为代表土样进行研究。其粒度分析结果见图 2, 中值粒径为 0.017mm。

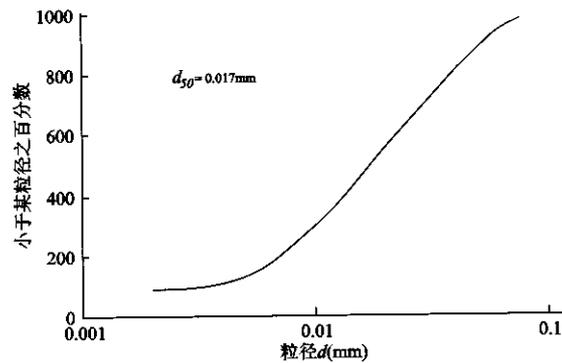


图 2 太湖试验土样粒径级配

Fig.2 Grain composition curves of silt in Taihu Lake

## 1.2 试验方法

试验开始前, 首先在水槽中部设置一总长约 10m 的凹槽作为试验段, 将太湖现场所取的土样置于其中, 并充分搅拌, 让其自然沉降密实。当其容重达到一定要求后, 开始进行波浪泥沙起动和输移试验。考虑到现场波浪要素和模型比尺对试验结果的影响, 本次试验波高为 3.5-19.0cm, 周期为 0.77-1.72s, 水深分别为 25cm 和 50cm, 共进行了 13 组试验。

首先进行泥沙起动试验, 从较小的波浪开始, 一直加大到泥沙开始运动为止。由于本研究的目的是通过试验得到不同波浪条件下水体的挟沙量, 因此本次试验的起动判别标准为泥沙普遍动, 即泥沙紧贴床面前后运动, 但还没有悬起。然后根据太湖实测资料, 加大波浪要素进行不同波浪动力条件下输沙试验。由于波浪前后运动基本对称, 因此只要测量几个周期内的水体平均含沙量, 就可确定其平均挟沙能力。由于波浪作用下悬浮泥沙扩散

较小，底层含沙量远大于上层，含沙量应分层测量，再通过计算得到沿水深的平均值。

## 2 起动和输沙试验

在波浪作用下，床面上的一些轻质物首先开始前后滚动，并形成细小的沙纹，随着波浪动力的加大，床面泥沙普遍运动，但泥沙颗粒基本不悬浮，此时定义其为泥沙起动。再加大波浪动力，床面泥沙开始悬起，瞬时含沙量随波浪底部水质点速度的变化而变化，但沿水深扩散较小，近底层含沙量明显高于上层，当波浪作用停止后，悬起的泥沙迅速沉降，高含沙层随即消失。

上述现象表明，波浪作用下的太湖泥沙的输移不同于较粗泥沙的底部推移质输沙，也不同于水流作用下淤泥的全断面悬浮输移，其输移主要以临底高含沙层泥沙沿波浪底部水质点运动方向往复运动。试验中发现，开始时，高含沙层水体的厚度和平均含沙量均随波浪动力的增大而增大，但当厚度达到一定值后，即使再加大波浪动力，其厚度也基本不变，而此时，高含沙层平均含沙量迅速增大，本次试验土样的高含沙层稳定厚度约为 1.4cm。由于波浪非对称性引起的传质速度较小，尽管波浪兴起的含沙量较大，但在一个周期内，其净输沙也非常小。同时，在一定波浪条件下，泥沙的悬扬和扩散往往达不到水体上部，而只限于临底一定高度内，泥沙扩散高度随波浪要素的变化而变化。

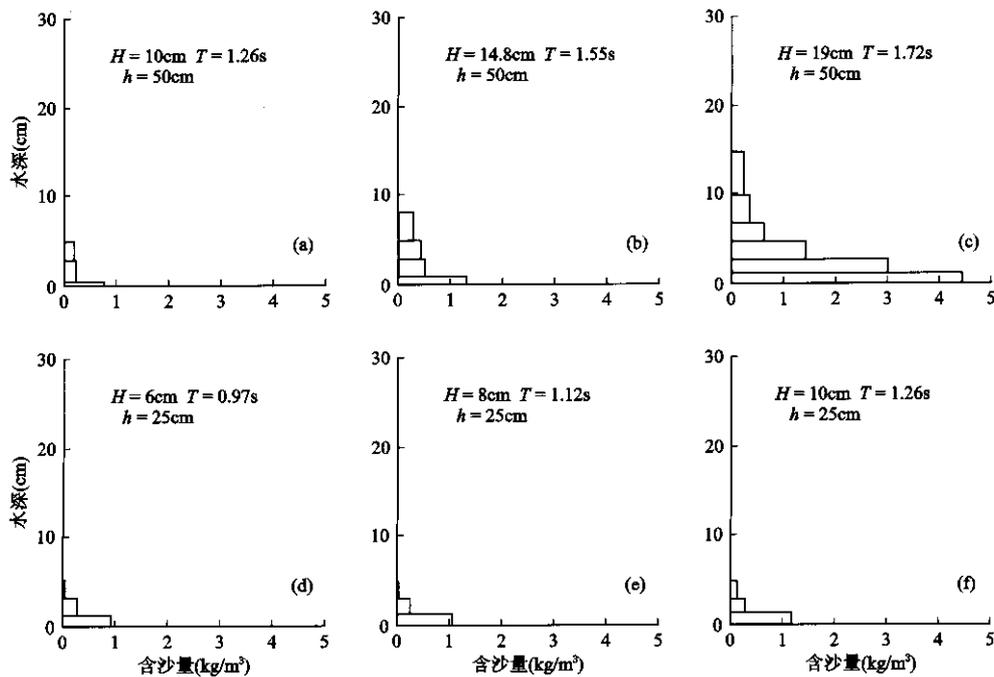


图 3 不同波浪要素作用下含沙量沿水深分布

Fig.3 Distribution of mean suspended sediment concentration under different wave elements

由图 3 可见，波浪作用下，近底层的含沙量远大于其上部水体，特别是在波浪动力较大时，这种现象更为明显。同时，水深对含沙水层的高度有影响，水深越大，含沙水层的高度越大，泥沙掀起越高。水槽试验中水深较大时的近底含沙量明显大于水深较小时的状

况,究其原因,可能是受波浪周期(即波长)的影响.因此,在研究波浪引起的泥沙输移时,仅采用波浪底部速度因子作为主要参数可能会引起较大的偏差.

### 3 波浪挟沙公式的建立

波浪作用下的床面水质点运动是近似对称的往复振动,泥沙颗粒也做相应运动.对于线性波在一个波周期内,正反向输沙量基本相等,净输沙为零.因此,研究波浪输沙常取其半波输沙率,或研究其一个周期的平均挟沙能力.以往的波浪泥沙研究结果表明<sup>[1-3]</sup>, Shields 参数是研究波浪泥沙输移的良好指标,波浪的挟沙能力应与其底部波浪 Shields 参数成正比.按 Madsen 和 Grant 方法<sup>[1]</sup>,波浪 Shields 参数可写为:

$$y_m = \frac{t_m}{(\rho_s - \rho)gd} \quad (1)$$

式中,  $\rho_s$  和  $\rho$  分别为泥沙颗粒和水的比重;  $g$  为重力加速度;  $d$  为泥沙颗粒粒径;  $t_m$  为床面剪切应力的最大瞬时值,定义为

$$t_m = \frac{1}{2} f_w u_b^2 \quad (2)$$

式中,  $u_b$  为波浪水质点近底水平速度的最大值,由微幅波理论确定;  $f_w$  为 Jonsson<sup>[4]</sup>波浪摩擦系数,可按下列式计算,即

$$f_w = \exp[5.213\left(\frac{a_b}{r}\right)^{-0.194} - 5.977] \quad (3)$$

当  $a_b/r \leq 1.59$  时,取  $f_w = 0.30$ . 其中,  $r$  为床面糙率,对于平底床面通常取泥沙中值粒径值,由于波浪作用下湖底泥面的沙纹尺度非常小,在此次计算中均取泥沙中值粒径值  $d_{50}$ ;  $a_b$  为近底水质点运动的有效振幅.

用上述公式对本次试验资料进行计算,结果列于表 1 (表中  $\psi_{mc}$  为临界 Shields 参数值,由本次试验结果取  $\psi_{mc} = 0.07$ ).

对表 1 中的试验结果进行曲线拟合,得到以波浪 Shields 参数  $\psi_m$  为变量的波浪挟沙能力计算公式:

$$S = 3.03 \times 10^{-4} g_0 (\Delta y_m^3 - 1.197 \Delta y_m^2 + 0.727 \Delta y_m) \quad (4)$$

式中  $\gamma_0$  为太湖表层泥土干容重,取  $1147 \text{ kg/m}^3$ ;  $\Delta \psi_m$  为相对 Shields 参数值,等于实际波浪 Shields 参数值与临界值的差,即

$$\Delta y_m = y_m - y_{mc} \quad (5)$$

表示 Shields 参数超过临界值时就开始有输沙.

图 4 为该经验公式的拟合曲线.由图可见,相关性较好,相关系数 0.98.

## 4 太湖航道泥沙淤积分析

### 4.1 计算方法

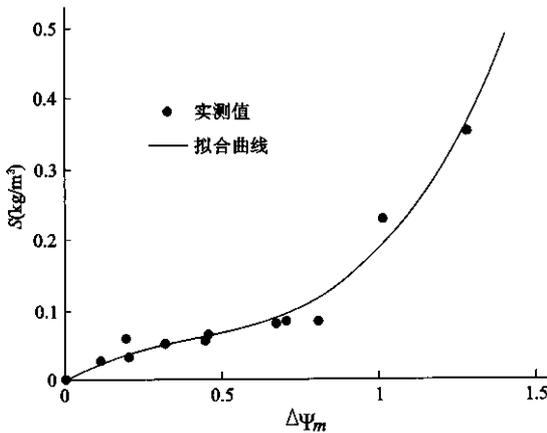


图 4 挟沙能力与波浪 Shields 参数关系

Fig.4 Suspended load versus Shields parameter

湖泊悬移质含沙量的高低，主要取决于入湖河流含沙量的大小、湖水深度、底质状态及风浪水动力特性等因素。而入湖河流挟带的泥沙含量又与地表径流对流域表土的侵蚀、流域内地形条件、土壤、植被、季节性气候变化、降雨强度及人类活动等因素有关。中科院南京地理与湖泊研究所曾对太湖环境进行研究<sup>[5]</sup>，结果表明：太湖流域地形坦荡，河床比降平缓，上游山区植被茂密，水土保持较好，因此除汛期含沙量较高外，其余时间上游河流挟带进入湖泊的泥沙甚微，均较难测得。本次研究在 2002 年 8 月对太湖城东港工程区附近地形进行了测量，并与 1992 年测图进行了比较，发现近 10 年来该区域水下地形基本没有发生改变，表明该处没有直接的陆域泥沙来源，航道发生淤积的泥沙应主要来自周围滩地在风成波和风成流作用下的搬运。太湖地区的各风向平均风速、最大风速及其频率的统计结果表明，全年 WNW、ESE 和 SE 风向频率和风速都较大，由此引起的波浪也强，对航道的淤积也有较大影响。

表 1 本次试验资料计算结果

Tab.1 Statistical data of each test scheme

组次	水深 (cm)	波高 (cm)	周期 (s)	Shields 参数 $\psi_m$	$\Delta \psi_m = \psi_m - \psi_{mc}$	平均含沙量 (kg/m <sup>3</sup> )
1	50	7.8	1.00	0.0842	0.0142	0.0000
2		8.5	1.20	0.1829	0.1129	0.0267
3		10.0	1.26	0.2724	0.2024	0.0325
4		15.0	1.22	0.5164	0.4464	0.0553
5		14.8	1.55	0.7704	0.7004	0.0826
6		19.0	1.43	1.0784	1.0084	0.2278
7		19.0	1.72	1.3442	1.2742	0.3530
8	25	3.5	0.77	0.0603	0.0000	0.0000
9		6.0	0.97	0.2627	0.1927	0.0592
10		8.0	0.91	0.3858	0.3158	0.0495
11		8.0	1.12	0.5281	0.4581	0.0650
12		9.8	1.10	0.7407	0.6707	0.0806
13		10.0	1.26	0.8737	0.8037	0.0820

由此可见，太湖航道淤积的主要原因是：滩上的泥沙在波浪作用下悬起，经水流携带进入航道，由于航道内水深较大，波浪挟沙能力较滩上小，以至造成悬沙落淤。因此，可采用刘家驹公式<sup>[6]</sup>计算航道淤积量。考虑到本次泥沙淤积机理的实际情况，采用的公式为：

$$P = \frac{K_1 t}{g_0} \omega (S_1 - S_2) \sin \theta \quad (6)$$

式中，P 为泥沙淤积强度； $\omega$  为泥沙沉速； $S_1$  为滩上水体平均含沙量； $S_2$  为航道水体平均含沙量；t 为淤积时间； $\gamma_0$  为淤积物干容重； $K_1$  为横越淤积系数； $\theta$  为水流与航道轴线所交之锐角。

由太湖泥沙特性试验结果<sup>①</sup>, 太湖悬浮泥沙的絮凝沉速为 0.15cm/s, 淤积物干容重取 1147kg/m<sup>3</sup>, 由工程区的波浪和泥沙条件, 联合波浪挟沙率公式 (4), 即可计算航道淤积量.

#### 4.2 淤积地形验证

为了考察该计算方法在本研究中的实际可用性, 首先应根据现有资料对工程区附近的实测淤积地形进行验证.

出于泄洪需要, 1993 年 10 月水利部门曾对城东港进行拓浚, 河底宽 50m, 河底高程 (吴淞) 0.0m, 引排流量 240m<sup>3</sup>/s, 并修建防洪水闸 2 座. 工程于 1995 年 11 月 20 日竣工. 为了验证计算方法的可用性, 2002 年 8 月, 南京水科院委托扬泰水文水资源勘测局对该地区水下地形进行测量, 结果表明在航道控制点 P<sub>1</sub> 附近, 拓浚后的深槽已发生淤积, 淤积高程 (1956 年国家高程基准) -0.80 至 -1.10m. 换算成同一高程系, 淤积厚度约 90cm. 考虑到口门附近航道可能受到引排水流的影响, 本次验证计算选取离口门一定距离的地方, 该处滩地高程约 -0.6m, 水深 1.7m, 深槽淤积前水深 3.0m, 经 6.5 年淤积后, 高程为 -1.0m 左右, 水深 2.1m. 按上文推荐的方法进行深槽淤积计算, 结果见表 2.

表 2 淤积强度验证计算\*

Tab.2 Verification results of sediment deposition

时 间(a)	E	ESE	SE	SSE	淤强(m/a)	累计淤厚(m)
1	0.018	0.056	0.088	0.021	0.183	0.183
2	0.018	0.056	0.088	0.021	0.183	0.366
3	0.018	0.056	0.088	0.021	0.183	0.549
4	0.018	0.051	0.077	0.021	0.167	0.716
5	0.018	0.040	0.060	0.021	0.139	0.855
6	0.018	0.027	0.040	0.021	0.106	0.961
6.5	0.009	0.008	0.010	0.011	0.038	0.999

\* N、NNE、NE、ENE、S、SSW、SW、WSW、W、WNW、NW、NNW 向淤强为 0.

#### 4.3 航道回淤计算

设计部门给出的航道规划线路有两个方案, 方案一为 P<sub>1</sub> P<sub>2</sub> P<sub>3</sub> P<sub>4</sub> P<sub>5</sub> P<sub>6</sub> P<sub>7</sub> P<sub>9</sub> P<sub>10</sub> P<sub>11</sub> P<sub>12</sub> 线, 方案二为 P<sub>1</sub> P<sub>2</sub> P<sub>3</sub> P<sub>4</sub> P<sub>5</sub> P<sub>6</sub> P<sub>7</sub> P<sub>8</sub> P<sub>10</sub> P<sub>11</sub> P<sub>12</sub> 线, 控制点布置见图 5.

采用上述方法对两个方案的各控制点年淤积强度分别进行计算, 再由航道各分段长度和宽度算得各段淤积量, 计算结果列于表 3.

由表可知, 方案一航道的年平均维护挖泥量约为  $33.21 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 最大淤积厚度在 P<sub>1</sub> 点附近, 达到 0.304m, 淤积主要发生在西太湖段, 而在 P<sub>10</sub> 和 P<sub>12</sub> 控制点附近, 由于波浪动力较小, 淤积量也较小. 方案二航道的年平均维护挖泥量约为  $38.78 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 略小于方案二淤积量, 造成这种差别的主要原因在于方案二避开了 P<sub>7</sub> 点的较大淤积段.

由表可知, 方案一航道的年平均维护挖泥量约为  $33.21 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 最大淤积厚度在 P<sub>1</sub> 点附近, 达到 0.304m, 淤积主要发生在西太湖段, 而在 P<sub>10</sub> 和 P<sub>12</sub> 控制点附近, 由于波浪动力较小, 淤积量也较小. 方案二航道的年平均维护挖泥量约为  $38.78 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 略小于方案一

① 黄建维等. 太湖泥沙静水沉降特性的初步试验研究. 南京水利科学研究院河港所 2002 年报告.

淤积量，造成这种差别的主要原因在于方案二避开了  $P_7$  点的较大淤积段。

## 5 结语

在以波浪为主要动力的强波弱流环境下，淤泥质底床的泥沙悬浮和输移研究成果相对较少，其既不同于沙质海岸情况，也不同于潮流和波浪共同作用下的淤泥质海岸。泥沙悬起后并不在整个断面扩散，而是在近底形成高含沙水层，在水流的推动下发生输移。本文通过水槽试验，对波浪作用下悬浮泥沙的含沙量及其沿水深分布进行了研究，建立了太湖底泥波浪挟沙力经验公式，并将其应用于具体工程的回淤计算，其结果与实测资料的验证基本一致。尽管本次研究是针对某一具体工程情况，但文中提出的波浪作用下淤泥的悬浮和输移方式，以及特殊情况下航道回淤分析方法都具有普遍的意义。

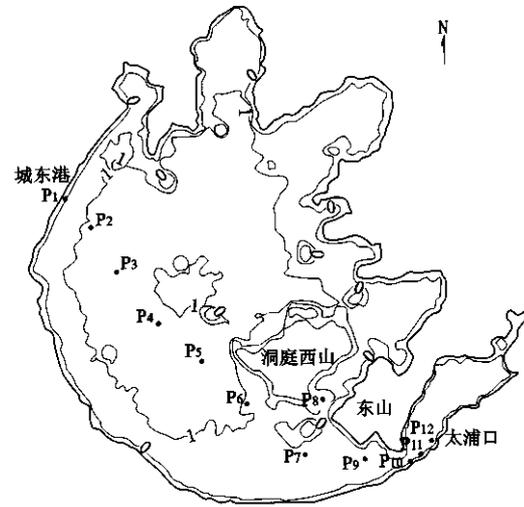


图 5 太湖航道控制点布置图  
Fig.5 Layout of control points of navigation channel in Taihu Lake

表 3 航道各控制点年淤积强度和各段淤积量计算结果\*

Tab.3 Calculated results of deposition of navigation channel in Taihu Lake

控制点	方案一				控制点	方案二			
	淤积强度 (m/a)	计算长度 (m)	年淤积量 ( $\times 10^4 \text{m}^3$ )	累计淤积量 ( $\times 10^4 \text{m}^3$ )		淤积强度 (m/a)	计算长度 (m)	年淤积量 ( $\times 10^4 \text{m}^3$ )	累计淤积量 ( $\times 10^4 \text{m}^3$ )
$P_1$	0.304	2405	3.72	3.72	$P_1$	0.304	2405	3.72	3.72
$P_2$	0.148	6131	4.58	8.30	$P_2$	0.148	6131	4.58	8.30
$P_3$	0.108	7924	4.31	12.60	$P_3$	0.108	7924	4.31	12.60
$P_4$	0.116	8517	4.97	17.58	$P_4$	0.116	8517	4.97	17.58
$P_5$	0.124	8221	5.13	22.71	$P_5$	0.124	8221	5.13	22.71
$P_6$	0.105	9377	4.95	27.67	$P_6$	0.105	8964	4.74	27.45
$P_8$	0.088	9240	4.09	31.75	$P_7$	0.21	9229	9.81	37.26
$P_9$	0.034	6277	1.07	32.82	$P_9$	0.034	6679	1.14	38.40
$P_{10}$	0.008	3825	0.15	32.98	$P_{10}$	0.008	3825	0.15	38.55
$P_{11}$	0.002	2719	0.03	33.00	$P_{11}$	0.002	2719	0.03	38.58
$P_{12}$	0.035	1153	0.20	33.21	$P_{12}$	0.035	1153	0.20	38.78

\* 淤积量按航道底宽 50m，开挖边坡 1:6 计算。

值得一提的是，在对淤泥质泥沙输移进行研究时，床面淤泥容重是一个非常重要的指标。本次研究只是在太湖底泥的某一相对稳定容重下进行，对波浪作用下不同容重淤泥的输移研究应在今后的工作中进一步展开。

## 参 考 文 献

- 1 Madsen O S, Grant W D. Quantitative description of sediment transport by waves. Proc 15th Coastal Eng Conf ASCE, 1976:1093-1112
- 2 Sato S, Horikawa K. Sand ripple geometry and sand transport mechanism due to irregular oscillatory flow. Proc 21st Coastal Eng Conf ASCE, 1988:1748-1762
- 3 Zhou Y-R, Chen Y-P, Ma Q-N. Threshold of sediment movement in different wave boundary layers. China Ocean Engineering, 2001, 15 (4): 509-520
- 4 Jonsson I G. Wave boundary layer and friction factors. Proc 10th Coastal Eng Conf ASCE, 1966. 127-148
- 5 孙顺才, 黄漪平. 太湖. 北京: 海洋出版社, 1993
- 6 刘家驹, 张镜潮. 淤泥质海岸航道港池淤积计算方法及其推广应用. 水利水运科学研究, 1993, 58 (4): 301-320

## Experimental Study on Silt Transport Due to Waves for Prediction of Navigation Channel Deposition in Taihu Lake

ZHOU Yiren<sup>1</sup>, XIAO Huixing<sup>2</sup>, PAN Junning<sup>1</sup> & ZHANG Jinshan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>: Harbor and River Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, P.R.China;

<sup>2</sup>: Communication Department of Jiangsu Province, Nanjing 210001, P.R.China)

### Abstract

The study on the sediment transport due to waves is necessary for prediction of deposition of waterway. Owing to the lack of appropriate formula for calculation of suspended sediment load in Taihu Lake under wave action, an experimental study on transport of silt collected from Taihu Lake is conducted by using a wave flume. In this paper, the process of entrainment and suspension of silt is quantitatively described, and detailed measurements of suspended sediment profiles are carried out for each run of the experiments. Based on the test results, an empirical relationship for calculation of the mean suspended load on waves is presented. The verification results of a case study show that the present equation is satisfying to be used in prediction of sediment deposition of waterway in Taihu Lake.

**Keywords:** Silt in Taihu Lake; transport; deposition of waterway; wave