

波浪水流共同作用下人工岛 周围局部冲刷的研究

秦崇仁 肖 波 高学平

(天津大学水利系)

摘 要 本文采用系列模型延伸法研究粉砂质海床上的人工岛在波浪和水流共同作用下的局部冲刷问题。对两个不同比尺的模型岛进行动床实验，测得模型岛周围底砂的冲刷深度及冲刷范围，将这两个比尺模型的实验结果经延伸而获得原体人工岛周围可能发生的最大冲刷深度。同时，在理论上探讨了模型与原体之间最大冲刷深度的比尺关系。研究中对三种不同方向组合的波流作用下人工岛周围的局部冲刷进行了实验，结果表明，以波流同向时的冲刷最为严重。

关键词 波浪 水流 人工岛 局部冲刷

前 言

人工岛为一种海上孤立式建筑物。研究中人工岛所在海区的底质为粉砂(细粉砂)。在这种海域建造的孤立式建筑物周围将发生局部冲刷，其局部冲刷具有如下特点：一是这种局部冲刷为波浪和水流(潮流)共同作用的结果。二是底质为分选很好的细粉砂，俗称“铁板砂”，它具有与粗砂不同的物理力学性质，又不同于浮泥和淤泥。因此，这种人工岛周围局部冲刷的范围、深度、冲刷坑形状等问题受到了极大的关注。但是，鉴于这些问题的复杂性和特殊性，目前还没有理论成果来回答这些问题，没有适当的工程实例或实验成果以兹借鉴。为此，我们进行了粉砂海床上的人工岛周围局部冲刷的研究，以解决工程中亟待解决的课题。

1 现有研究成果简介

1.1 冲刷机理

海底泥沙在等流速作用下常能维持一平衡状态，但当一建筑物立于此海底后，建筑物附近流速的增加破坏了该地区泥沙的平衡，于是出现局部冲刷。随着冲刷的进行，冲刷坑逐渐发展，而近底处的流速逐渐减小，直到达到再次平衡，冲刷停止，这时冲刷坑保持稳定的形状。

1.2 引起局部冲刷的水流结构

试验研究及现场观测均表明,水流与结构物相互作用产生的涡流是导致局部冲刷的主要动力^[1~4].

位于恒定流场中的圆柱体,首先在圆柱的迎流面形成一股向下的二次流,然后在水底处产生马蹄形涡流,并沿圆柱边缘流向下游^[5].位于波浪场中的圆柱体,由于近底处的水质点作振荡运动,因此在圆柱附近形成的涡流较弱,涡流的尺度与Keulegan-Carpenter数($U_b T/D$)有关^[1].

1.3 冲刷坑的形状与最大深度

对单向水流的作用,圆柱体周围的底砂将形成马蹄状的冲刷坑.圆柱的上游侧为半个倒置的截头圆锥,而下游侧为两个平行的谷.对波浪的作用,圆柱周围的底砂将形成径向对称的倒置截头圆锥状的冲刷坑^[3].

关于冲刷坑深度,Breusers等人^[6]和Imberger等人^[4]对水流作用下圆柱周围最大冲刷坑进行了研究,经过量纲分析得到:

$$\frac{h_s}{D} = f\left(\frac{u}{u_c} \left[\text{或} \frac{u_*}{u_{c*}} \right], \frac{h}{D}, \frac{d_{50}}{D}\right), \quad (1)$$

式中, h_s 为冲刷坑的最大深度, D 为圆柱的直径, u 为未扰动水流的平均速度(u_* 为剪切速度), u_c 为泥沙的起动速度(u_{c*} 为起动剪切速度), h 为水深, d_{50} 为泥沙的中值粒径.研究表明, u/u_c (或 u_*/u_{c*}) >0.5 时发生局部冲刷.对粗颗粒沙,当 $u/u_c > 1$ 和 $h/D > 2$ 时,式(1)可简化为:

$$h_s = (1.3 \sim 1.75)D. \quad (2)$$

Imberger^[4]得到的经验公式为:

$$h_s = 2.18 \left(\frac{u_*}{u_{c*}} - 0.374 \right) D. \quad (3)$$

另外,Parlmer^[3]根据现场观测得到的最大冲刷坑深度为:

$$h_s = (0.5 \sim 0.75)D.$$

从前面的简介中可以得到几点有益的启示.首先,上面介绍的成果中,建筑物是小尺度的圆柱体,它所处的水深远大于它的直径,这样,它周围的水体只发生绕流,而我们所要研究的人工岛所在处的水深远远小于人工岛直径($h/D < 1/10$),因此,人工岛周围的水体不再是绕流问题,而是人工岛周围的整个流场将要发生变化;其次,上面所介绍的研究成果中建筑物均建于粗沙海床上,与我们所研究的人工岛处的底质(粉砂)有完全不同的物理力学性质.因此,我们的研究课题不仅具有现实的工程价值,而且在理论探讨上也十分有意义.

2 实验条件及实验研究的指导思想

2.1 根据研究中人工岛的建岛位置和波浪、潮流特点,原体条件如下

人工岛直径60m,建岛处水深分别为5.91和4.51 m,波高2.40 m,周期7.3 s,实验中采用定常流,当地的平均潮流流速为80 cm/s.实验采用原体砂,颗粒级配曲线如图1所示.

2.2 模型实验类型的选择

物理模型实验有定床模型试验、动床模型试验和系列模型试验等。

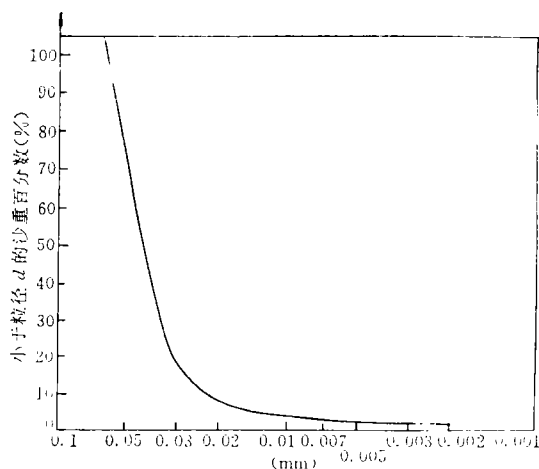


图1 颗粒级配曲线

定床模型试验，只能做到使模型中的水流与原形基本相似。在这种模型的上游放入煤粉等轻质砂，可以观察它们的运动情况，从而推测出原形中可能出现的冲淤变化。显然，这类模型只能用来了解泥沙运动的现象和发展趋势，不可能给出定量的结果，这只是一类定性模型。因此，这类模型试验不能满足我们的要求。

由可动的模型砂制成底床的模型为“动床模型”。在这类模型中，不仅可以看到发生冲淤变化的位置，而且可以观察到冲淤的发展过程。但这种变化在数量上能否与原形相似，则取决于模型砂与原形砂的运动是否能够完全相似而定，而要满

足这个条件，困难是很大的。由于几何相似和泥沙运动相似对模型砂提出彼此矛盾的要求，因此，满足这个条件几乎是不可能的。特别是建岛地区的底砂，由于具有自己的特点，致使这种砂是现在通常采用的模型砂，如煤粉、木屑、塑料砂、电木粉等是无法模拟的。同时这种动床模型还必须有实测资料来进行验证，否则无法判断实验结果的可靠性。因为在人工岛建成以前，不可能得到实际的冲刷变化资料，所以就我们的研究内容而言，动床模型实验显然是不适合的。

在动床模型中，由于模型砂的运动很难与原形砂完全相似，实验结果常有一定偏差。自然，这种偏差与模型的大小有一定的联系——模型越大，偏差越小，模型大到与原形一样，则偏差为零。依据这一概念，可以同时制作比尺不同的系列模型，同时将原形看成是比尺为1的模型，这样把由各种模型得出的结果，顺其趋势延伸到原形，从而正确地得出没有偏差的原形值来，这就是“系列模型延伸法”^[7,8]。这种方法一向被认为是一种获得定量结果的可靠方法。其优越性在于，可以采用原形砂（或天然砂）做实验用的模型砂，而且可以免去实测资料的验证。因此，这正是解决我们的研究课题的唯一适宜的实验研究方法。

3 模拟范围及模型比尺的确定

在海上建造人工岛后，周围的流场及波浪场由于岛的存在将发生变化。我们首先对人工岛周围流场的变化进行数值计算，结果表明，流场的变化范围不超过2.5~3倍的人工岛半径。从已有的研究成果知道，由于波浪绕射而使波场发生变化的范围不超过2~2.5倍人工岛半径。因此，实验模拟的范围应尽可能包括流场和波场的变化，模型的边界应在波流场发生变化的范围之外。模型规模就是根据上述原则确定的。

为了最后确定模型的几何比尺, 我们首先用原体砂进行水槽实验, 测定了单独水流、单独波浪作用下以及水流和波浪共同作用下, 原体沙的运动情况. 主要实验结果如表1所示.

表1 波浪、水流共同作用下建岛地区粉砂起动实验

几何比尺	水槽实验	波高 H (cm)	泥沙运动情况
$\lambda_1 = 1/40$	水深 $h = 15$ cm	0	泥沙不起动
	表面流速	3.93	有颗粒移动
	$V_1 = 12.6$ cm/s	5.06	部分颗粒移动
		5.85	泥沙起动
$\lambda_1 = 1/30$	$h = 20$ cm $V_1 = 14.6$ cm/s	0	泥沙不起动
		5.05	有颗粒移动
		6.23	基本起动
		7.79	比 $H = 6.23$ 明显些
		9.92	泥沙明显移动
$\lambda_1 = 1/25$	$h = 24$ cm $V_1 = 16$ cm/s	0	泥沙不起动
		6.44	基本不动
		9.16	基本起动
		10.08	泥沙明显移动

由表1可看出, 当 $h = 15$ cm, $V_1 = 12.6$ cm/s, $H = 5.85$ cm, $T = 1.17$ s时, 泥沙接近起动, 即处于起动前的状态. 这种情况大致相当于原体水深6 m, 表面流速 $V = 80$ cm/s, $H = 2.34$ m, $T = 7.4$ s的情形, 这时模型的几何比尺相应为 $1/40$.

根据表1的结果, 我们选择两个几何比尺进行模型实验, 即, $\lambda_1 = 1/40$ 和 $1/25$, 目的是使两个模型的几何比尺相差大一些, 便于实验成果的延伸. 选择这两个比尺的依据是: 模型和原体中泥沙的运动状态应该一致, 即在原体中未建造人工岛之前, 泥沙不应形成输移, 而在建造人工岛之后, 由于人工岛周围波流场的变化才能发生泥沙输移, 从而造成局部冲刷. 模型中的泥沙运动状态也必须是这样.

在调试试验时, 证明我们根据水槽试验确定的几何比尺是适当的, 泥沙运动的状态也和我们预料的相一致.

最后, 根据水槽实验的结果和模型的几何比尺, 确定模拟的海域面积分别为 $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ (模型几何比尺为 $1/25$) 和 $480\text{ m} \times 480\text{ m}$ (几何比尺为 $1/40$), 上述范围远远大于波流场发生变化的范围. 这样, 模型的边界就不会对实验结果产生影响, 以保证实验结果的可靠性.

4 模型设计和布局

按照实验要求, 应对波流同向、波流逆向、波流方向正交等三种情况下的人工岛周围的局部冲刷进行实验研究, 因此, 模型应能产生上述三种情况的波、流场. 为此, 我们所设计的模型可以产生自西向东和自北向南的两个方向的均匀流, 同时, 可以产生自西向东和自东向西两个方向的波浪,

在放置人工岛模型之前, 首先进行水位-流速的调试.

开启水泵, 待水流平稳后, 由上游平水池和下游尾门相互配合, 将水位调到所需高度, 然后, 沿着整个模型宽度方向, 每0.5m测取一个流速值, 如流速达不到所需要的均匀分布的数值, 则调整上游给水渠道的底孔的出水面积. 经过反复的调整和测量, 直至沿全模型宽度方向的流速均匀分布并达到所需要的数值为止.

水位-流速调整好以后, 再开动生波机先调节波周期, 使之达到所需要的数值, 然后再调波高, 直至达到所需要的波高值为止. 至此调试试验全部完成.

原始的水位、流速、波要素全部调整完毕后, 才安置人工岛模型, 装填模型砂. 模型砂要经水浸泡数日, 直至模型沙达到自然密实状态, 再对模型砂床面进行整平, 使之与模型底面齐平. 上述工作完成以后, 即开始进行正式试验.

7 关于局部冲刷比尺的理论考虑

众所周知, 泥沙运动的基本方程式(泥沙运动连续性方程)为:

$$\frac{\partial h_e}{\partial t} + \frac{\partial q_n}{\partial n} = 0, \quad (5)$$

式中, q_n 为虚体积输沙率(脚标 n 表示方向), h_e 为冲刷深度(脚标 e 表示冲刷). 将式(1)写成差分形式:

$$\frac{\Delta h_e}{\Delta t} = -\frac{\Delta q_n}{\Delta n}, \quad (6)$$

则

$$\Delta h_e = -\frac{\Delta q_n}{\Delta n} \Delta t. \quad (7)$$

今取 \bar{q}_n 为人工岛周围冲刷最深处的时间平均输沙率, 无冲淤变化处的时间平均输沙率则为0(见图3), 于是有:

$$\Delta q_n = \bar{q}_n - 0.$$

设 n_e 为最大冲刷深度处与无冲淤变化处的距离, t_e 为自冲刷开始至冲刷终止的时间, h_e 为最大冲刷深度, 于是有:

$$\Delta n = n_e - 0,$$

$$\Delta t = t_e - 0,$$

$$\Delta h_e = h_e,$$

所以有:

$$h_e = -\bar{q}_n \frac{t_e}{n_e}. \quad (8)$$

事实上该式是对式(7)的一种积分形式.

关于输沙率 \bar{q}_n , 在一般情况下常写成无因次输沙强度参数的形式:

$$\bar{\Phi} = \frac{\bar{q}_n}{d_* \omega}, \quad (9)$$

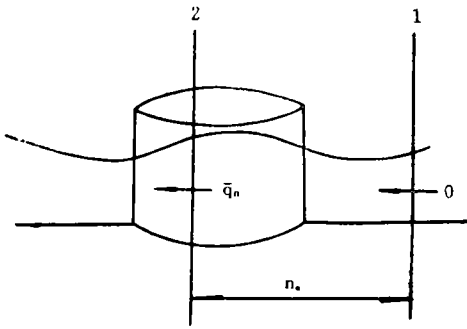


图 3

式中, ω 为泥沙颗粒沉速.

已有的研究成果表明, 当不存在人工岛时, 无因次输沙强度参数与水流强度参数 ψ 存在函数关系, 即:

$$\bar{\Phi} = F_1(\psi), \quad (10)$$

而且 $F_1(\psi)$ 是某种形式的指数函数:

$$\bar{\Phi} = C\psi^\alpha, \quad (11)$$

式中, 系数 C 和指数 α 均需由实验资料确定.

无因次水流强度参数为:

$$\psi = \frac{\rho u^2}{(\rho_s - \rho)gd_s}, \quad (12)$$

式中, u 为流速, ρ_s 、 ρ 分别为泥沙颗粒和水的密度, g 为重力加速度, d_s 为泥沙粒径.

当采用原体砂做模型砂时, 泥沙颗粒的沉速、密度和粒径的比尺均为 1, 则有:

$$\lambda_\omega = \lambda_{\rho_s} = \lambda_{(\rho_s - \rho)} = \lambda_{d_s} = 1 = \lambda_l^0, \quad (13)$$

而且, 对于同类的问题, 常数 C 的比尺也是 1, 于是式 (9) 可写成比尺形式:

$$\lambda_{\bar{\Phi}} = \lambda_c \cdot \lambda_u^{2\alpha} \cdot \lambda_{(\rho_s - \rho)}^{-\alpha} \lambda_{d_s}^{-\alpha} = \lambda_u^{2\alpha} = \lambda_l^\alpha. \quad (14)$$

式 (14) 中的流速为不存在人工岛时的流速, 但人工岛建成后流场将发生变化, 因此, 研究人工岛周围的冲淤变化时, 应引入变化后的流速, 而变化后的流速除与原始 (未变形) 的波浪、水流流速 (u_∞) 有关外, 还与人工岛的相对尺度 D/h_0 (D 为人工岛直径, h_0 为初始水深) 有关. 由于我们采用正态模型, 故人工岛尺度对流场变形的影响是相似的, 即人工岛相对尺度 D/h_0 的比尺为:

$$\lambda_{D/h_0} = 1. \quad (15)$$

这样就使问题得到了大大的简化, 即式 (14) 也可以应用于人工岛周围局部冲刷研究的比尺关系. 于是根据式 (8), 可以写出冲刷深度的比尺关系:

$$\lambda_{h_c} = \lambda_l^m \lambda_{(\rho_s - \rho)}^{-1}. \quad (16)$$

根据重力相似准则, 时间比尺与距离比尺分别与几何比尺成 1/2 次方和 1 次方关系, 所以, 最后将指数合并在一起写成:

$$\lambda_{h_c} = \lambda_l^m,$$

指数 m 必须由实验确定.

8 实验结果

模型实验正式开始前, 首先用地形仪测量水下沙床的初始高程, 然后, 开启生波机正式进行实验. 实验过程中, 每隔一定时间间隔测量一次水下地形, 直至两次相继测得的地形不再变化, 则表明冲刷已达到稳定状态, 即结束本次实验.

实验共进行 6 组, 其中波浪、水流同向时 4 组, 波浪、水流逆向时 1 组, 波浪、水流方向正交时 1 组. 实验结果见表 3,

表3 实验结果

序号	比尺	水深 (cm)	波高 (cm)	周期 (s)	干容重 (kN/m^3)	孔隙率	最大冲刷深度 (mm)	实验历时 (h)	流场情况
1	1/40	14.8	6.0	1.15	13.82	0.47	50	50	波
2	1/40	11.3	6.0	1.15	14.72	0.43	36	50	流
3	1/25	23.6	9.6	1.46	14.03	0.46	80	60	同向
4	1/25	18.0	9.6	1.46	14.32	0.46	53	55	同向
5	1/25	23.6	9.6	1.46	14.62	0.44	50	50	波流逆向
6	1/25	23.6	9.6	1.46	15.21	0.42	70	50	波流正交

原体底质孔隙率为0.41，模型孔隙率为0.4，对冲刷深度造成的偏差不超过4%，因此，对冲刷深度没有修正的必要。

根据前面理论推导的结果可知，两组不同比尺的模型实验结果在双对数格纸上呈一直线（图4）。直线的斜率即为指数 m ，图中直线与纵坐标轴的交点即为原体的冲刷深度。

在实测中曾测得个别测点冲刷深度达100 mm（比尺1/25，水深23.6 cm），该测点在与波向成 60° 线上最近岛壁的位置上。因此，为安全计，我们认为，在水深为5.91 m时最大冲刷深度可定为2.0~2.5 m，在水深为4.51 m时最大冲刷深度可定为1.5~1.8 m。

在实验过程中观察到的冲刷过程是这样的：

当调整好流速以后，在未开动生波机前，岛周围的泥沙并不起动作。开动生波机以后，首先发现有泥沙运动的部位是与波浪方向成 45° 角左右的岛壁附近的地方，起初呈一缕一缕的状态向下游方向流去，以后形成泥沙云状向后“飘”去，但这时还不是局部冲刷的关键时期。实验中发现，在实验开始后的前几个小时内，冲刷坑发展比较缓慢，实验10 h以后，冲刷坑发展加快，待冲刷一定深度后又逐渐变慢直至形成稳定的冲刷坑。

在波流方向相同时，冲刷坑的平面形状如马蹄形，冲刷最深的部位在与波流方向呈 $\pm 60^\circ$ 角的范围内，与岛壁呈同心弧状，最深处与岛壁的距离大致为波长的 $1/4$ 。

冲刷主要发生在人工岛上游半圆，下游半圆则冲刷较轻。在背向波流方向的部位（即人工岛的背面）还有轻微的淤积（见图5）。

从径向方向看，冲刷集中在 $(1/4 \sim 1/2)$ 波长的范围内，超过 $1/2$ 波长的范围则冲刷逐渐轻微，直至不再有冲刷现象。

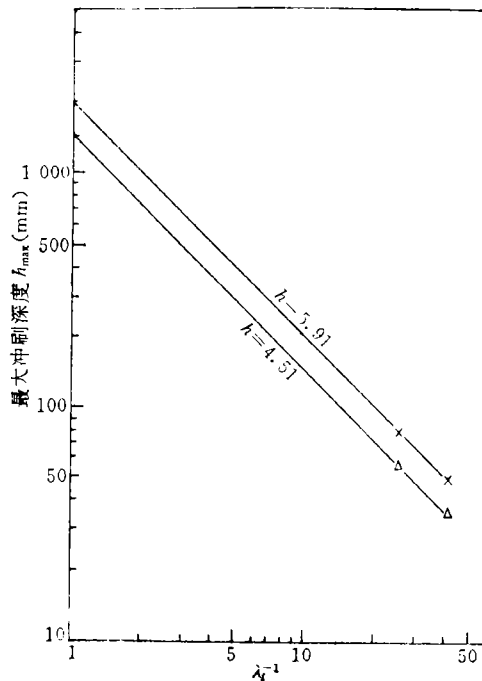


图4 系列模型实验结果延伸曲线

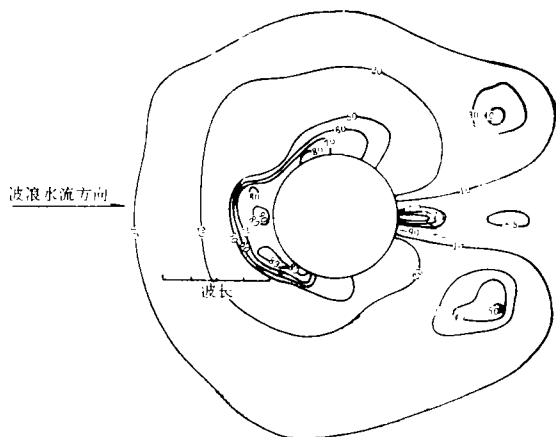


图5 冲刷地形等深线
+淤积

在波、流逆向时,由于波、流流速反向,能量有所抵消,冲刷坑的范围和深度都比波流同向时小。

在波浪方向与水流方向正交时,冲刷的范围和最大深度也比波流同向时小。

从三种波流方向的不同组合看,波流同向时,冲刷范围最大、深度最深,因此,从工程观点看,应以波流同向时的冲刷状况为依据,采取工程措施。

9 结论和讨论

1. 从实验研究和理论探讨来看,实验

成果是令人满意的,在给定的波浪、水流和水深条件下,最大冲刷深度分别为 2.0~2.5 和 1.5~1.8m;冲刷集中在人工岛周围 ($1/4 \sim 1/2$) 波长以内,因此,建议防护范围定为岛壁外 30 m 左右。

2. 图4中的直线在双对数坐标纸上的斜率为 45° ,这表明冲刷深度的比尺与模型的几何比尺成线性关系,即与速度比尺的平方成线性关系,这意味着冲刷深度与流体的动能成比例。这一点使图4中的直线得到了物理上的解释。

3. 本研究中成功地利用系列模型延伸法解决了粉沙质海床上人工岛周围局部冲刷的问题。本文第一作者以前还利用系列模型延伸法研究过进港航道在波浪作用下的淤积问题,同样获得了成功。系列模型延伸法在诸如河流中桥墩周围的冲刷问题的研究中可以找到不少实例,而在海岸动力学领域内利用系列模型延伸法研究泥沙冲淤变化的问题,实例还很少见。因此,我们认为将系列模型延伸法推广应用到海岸动力学领域中来,对海岸地区的泥沙动床物理模型的实验研究是很有价值的。

参考文献

- 1 Isaacson M. Sediment erosion artificial island. In: 21st IAHR Congress, 1985, 161~165
- 2 Niedoroda A W. The descriptive physics of scour in the ocean environment. Offshore Technology Conference, Paper 4145, 1981, Vol.4, 297~304
- 3 Palmar H D. Wave-induced scour on the sea floor. In: Proc. Civil Engineering in the Ocean, 1969, 703~716
- 4 Imberger J, D Alsch and J. Schepic. Scour behind circular cylinders in deep water. In: Proc. 18th Conference on Coastal Engineering, 1982, 1522~1554
- 5 谢世楞. 海上墩式建筑物周围的冲刷问题. 交通部第一航务工程勘察设计院, 1986
- 6 Breusers H N C, Nicollet and H W Shen. Local scour around cylindrical piles. J. of Hydraulic Research, 1977, 115, 211~252
- 7 沙玉清. 泥沙运动学引论. 北京: 人民交通出版社, 1965, 283~302
- 8 陆 浩. 系列模型延伸法及其模型沙的选择. 泥沙研究, 1987, (1): 10~17