

圆柱振荡绕流对淤泥床的冲蚀*

浦 群 李 坤

中国科学院力学研究所, 北京 100080

摘要 本文实验研究不同圆柱直径和不同初始圆柱与床面距离时圆柱振荡绕流对其下方淤泥介质床面的冲蚀作用。实验得到了在产生冲蚀的临界条件下圆柱与床面初始无量纲距离随振荡流 Kc 数的变化规律。由于不同的无量纲间距下圆柱振荡绕流分离流动的旋涡运动类型的不同, 形成了冲蚀床表面的不同类型的表面冲蚀图象。

关键词 振荡流; 冲蚀; 圆柱绕流; 淤泥床; 冲蚀图象

中图分类号 TV131.2; TV149; P756.2

0 引 言

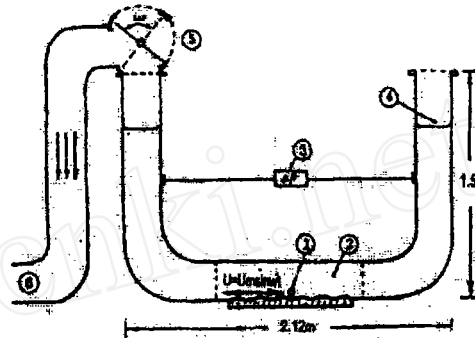
随着海上油气资源开发的日益发展, 海底管线的应用也越来越多。海底管线通常处于恶劣的环境之中, 在波浪和海流作用下, 管线周围的海床冲蚀可使管线悬空超过设计高度而产生断裂, 或因产生振荡力, 在长时间作用下使管线疲劳破坏, 因此管线周围的冲蚀是管线安全经济设计需要考虑的重要因素^[1]。管线周围的冲蚀受流动、地形、土质等多种环境因素的影响, 现象十分复杂。从流体力学的角度看, 波浪中管线的冲蚀涉及非定常往复运动中的旋涡分离流动, 因为产生床面冲蚀, 床面边界处于动态变化之中, 边界的改变以及床质进入水体, 都会使绕管线的旋涡分离流动与固壁平板床^[2]有所不同; 从泥沙起动和输运来看, 非定常泥沙起动和输运问题是当前泥沙研究的前沿问题^[3], 加上流动中的强涡旋流及往复流动中复杂的旋涡相互作用, 情况就更为复杂了; 如果考虑悬空管线的涡激振动反过来对流动及泥沙起动和输运等的影响, 则更复杂了。鉴于问题的复杂性, 完全模拟实际情况几乎不可能, 所以在合理的简化条件下进行机理研究和相关性、规律性的研究十分必要。波浪中管线周围冲蚀的研究相对于均匀单向流要少, 但也已推荐了一些工程应用的相关公式^[1, 4, 5]。由于考虑的影响因素并不相同, 应用条件下也各有局限, 且主要针对砂土床质, 床质不同对冲蚀如何影响并不清楚。总之, 现有研究表明, 由于波浪中管线周围冲蚀现象极其复杂, 对冲蚀发生发展的机理认识还远没有清楚, 不同条件下相关规律的研究也还待扩充和深入。

振荡流动是对波浪运动的重要简化, 本文试图通过在不同柱径和不同柱体与床面初始间距条件下, 圆柱振荡绕流对淤泥床的冲蚀的实验研究, 从对复杂流动的认识出发, 揭示冲蚀现象, 研究冲蚀机理并建立各参数间的有效关联。

*国家自然科学基金资助项目, 中科院“九五”重大项目“KZ951-405”支持。
本文于1999年6月23日收到

1 设备、土样、模型和测试

试验在 U 型振荡水槽中进行, 如图 1 所示, 试验段为 $0.2 \times 0.2 \times 0.8 \text{ m}^3$, 其下方有 $0.035 \times 0.2 \times 0.6 \text{ m}^3$ 的土槽, 用以放置床质材料。振荡水槽能实现周期性的简谐振荡, 现用设备的振荡周期为 2.59 秒。土样为取自东营港口门外 5~7 米深处的淤泥, 其比重为 2.761 g/cm^3 , $d_{50}=0.0047 \text{ mm}$, 分选系数 $\eta=2.86$, 细颗粒百分比为 72%。试验前取适量泥样, 加水搅匀至所需初始容重, 将砂放置于盛有淤泥的大槽中, 使淤泥在砂槽中自然沉积, 取出刮平后置于试验段底部进行试验, 同时测定沉积后用于试验的淤泥的容重 ρ 。也可从固结实验曲线由初始容重查得一定固结时间后的容重。泥样的固结实验表明, 除特别小的初始容重外, 在同样固结时间下初始容重大的固结后容重也大些。



1 模型 2 带砂槽试验段 3 差压传感器 4 水面
5 蝶阀 6 与风机相连的风道

图 1 实验装置示意图

1. model 2. test section with a sand box
3. A differential pressure transducer
4. water level 5. A butterfly-valve
6. wind tunnel connected with an air blower

Fig. 1 A sketch of apparatus.

圆柱模型有直径 $D=2.89 \text{ cm}$ 和 $D=1.91 \text{ cm}$ 两种, 轴线垂直于振荡来流取不同的与床面初始间距固定于试验段中。实验时由试验段背面光源打出的光, 经光幕漫反射后透过试验段, 被正面暗室中的 CCD 摄像机接收, 信号分别输入计算机和录象机进行采集和记录, 根据床面上方灰度的突变可判断床面的起动。同时记录相应的振荡来流振幅值。录相机和监视器可监测起动后冲蚀的初期发展, 经过一段时间后由于水流变浑无法监视, 故采取在床面起动后取相等的振荡时间, 如均为 2 小时左右停止实验, 放水后取出砂槽, 测量床面的冲蚀深度并拍摄床面的冲蚀图象。

振荡流动的 K_c 数定义为

$$Kc = U_m T / D \quad (1)$$

其中 T 为振荡周期, D 为柱径, U_m 为振荡来流的速度幅值。雷诺数为

$$Re = U_m D / \nu \quad (2)$$

ν 为水的运动粘性系数。

2 实验结果和分析讨论

对一定的圆柱距床面无量纲初始间距 e/D 和柱径 D , 当振荡来流的振幅较小时, 床面的淤泥并不起动, 逐步加大来流振幅, 当来流振幅达到一定值时, 床面的淤泥在局部区域扬起, 称之为床面发生冲蚀的临界状态。为消除淤泥容重和固结时间不同对实验结果的影响, 取初始容重基本相同并都经过四天沉积后已形成一定结构的泥样进行试验, 将临界状

态下 e/D 随 K_c 数变化的结果给出于图 2。该结果可用下式较好的拟合：

$$(e/D)_{cr} = 21gK_c - 2.34 \tag{3}$$

为了比较，图中还给出了文 [6] 所给的床质为磺酸型阳离子交换树脂的砂床下起始冲蚀的实验结果。泥沙起动研究指出，对于象淤泥这样的泥沙颗粒，起动时除了要克服颗粒的有效重力外，还要克服粘性细泥沙颗粒之间的相互作用力，非均匀砂的情况则还涉及起动时床面粗化或细化等不恒定特性；而对模型砂，其颗粒均匀，粘性相互作用可以忽略。虽然两种床质材料性质极不相同，起动机制也不一致，但从图 2 可以看到，同样床质材料的实验结果大致落在相同斜率的直线上，床质不同可用直线的截距不同来概括。这一结果将对实际应用中判断不同土质下床面冲蚀是否发生带来很大的方便。同时，实验也表明，利用 U 型振荡水槽可对不同土样的起动进行有效和方便的研究。

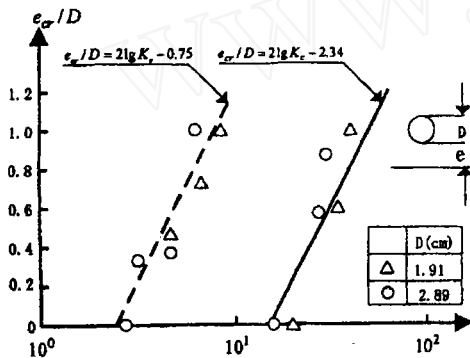


图 2 临界圆柱与床面间距与 K_c 数的相关

Fig. 2 The relationship between the critical gaps and K_c numbers

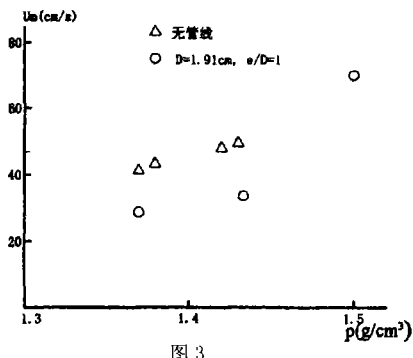


图 3

柱径为 1.91cm、 $e/D=1$ 条件下淤泥容重对起始冲蚀的影响示于图 3，床质都固结 4 天，不同容重下无柱振荡流动时起动实验的结果也给出在图中，无柱时淤泥固结的时间都少于有柱情况。结果表明，圆柱的存在使起动的振荡来流速度幅值降低，即使圆柱距床面有一定距离，其影响也很明显，而容重的增加会使床面冲蚀不易发生。

床面冲蚀开始发生时，淤泥床质成片状冲起，表明与水交界面处的淤泥形成了一定的结构，随着冲蚀的发展，下层的床质则以颗粒雾状进入水体。在临界冲蚀条件下， $D=1.91\text{cm}$ 时冲蚀两小时后不同 e/D 下床面形态可在停止实验后取出砂槽盒进行床面深度测量得到，结果见图 4，相应的床面形态见图 5 照片。由图可见， $e/D=0$ 时，床面冲蚀主要在柱下方； $e/D=0.6$ 时，柱下方及两侧床面均有冲蚀； $e/D=1.0$ 时，冲蚀主要发生于两侧床面。从相应照片可以看到， $e/D=0$ 时，冲蚀床面可见明显的流向沟槽，

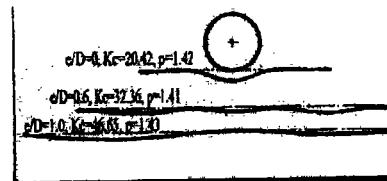


图 4 不同 e/D 下的冲蚀床型面
Fig. 4 scour bed profiles at different e/D

反映出床面附近流动产生了展向不稳定，实验条件下波长 $\lambda=9\text{mm}$ 。 $e/D=0.6$ 时，冲蚀床面除在柱下方可见流向沟槽外，在柱两侧的冲蚀床面上还可看到菱形状态的冲蚀坑。 $e/D=1.0$ 时，柱下方的冲蚀已不明显，两侧可见大面积冲蚀坑。以上冲蚀型线和形态的类型不同主

要是不同 e/D 和 K_c 数下床面附近柱体振荡绕流的流态不同的结果。

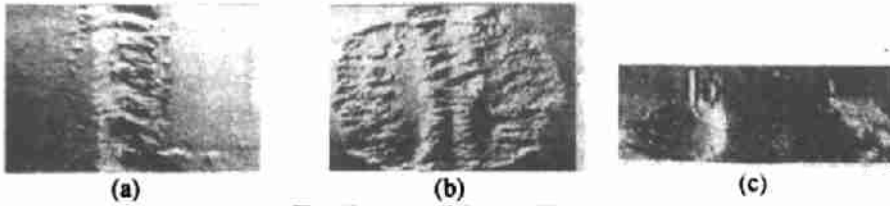


图5 不同 e/D 下的床面冲蚀现象

Fig. 5 scour patterns of the beds at different e/D

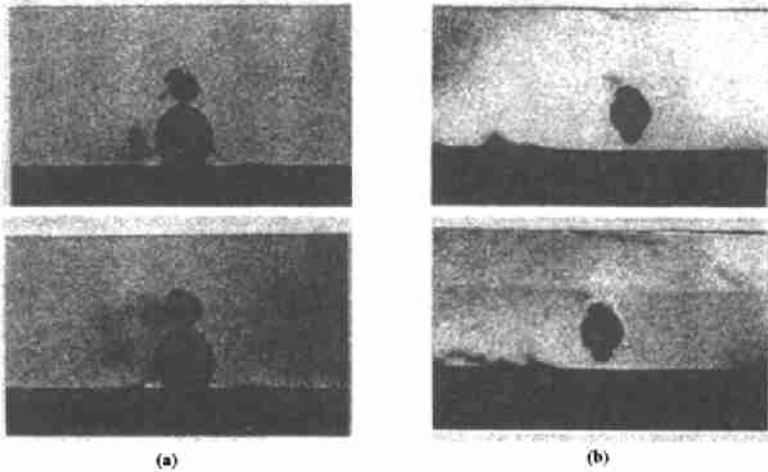


图6 不同 e/D 下的初期冲蚀现象

Fig. 6 incipient scour phenomena at different e/D

由于淤泥的颗粒很细, 仅 $4.7 \mu\text{m}$, 所以当起动进入水体后, 淤泥颗粒相对流体流动有很好的跟随性, 因此在水体中含沙量尚未达到使水体浑浊不清之前, 试验段正面摄像机记录给出了有冲蚀情况下圆柱振荡绕流流谱的发展过程。典型绕流流场给出于图 6。由 6(a) 可见, 对 $e/D=0$ 的情况, 在冲蚀的初期, 起动首先发生在迎风侧的分离区内, 并随正向来流在半个周期内的加速和减速, 贴着柱壁卷起为正向涡流, 然后向柱顶方向运动并扩散, 当涡流处于柱顶上方时, 正向流速为零, 涡流不再向背风面运动; 随着流动的反向, 反向的分离区内床面淤泥开始扬起, 随着反向流动的加速与减速, 流动与正向过程类同, 而处于柱上方的正向涡流在反向来流加速时即开始向背风区运动。随着时间发展, 迎风分离区内床面不断冲蚀, 当柱下方与床面之间形成间隙后, 流体可在间隙中通过, 所以, 迎风分离冲蚀变成背风尾流冲蚀, 由于 $e/D=0$ 时临界 K_c 数较小, 并不形成很长的振荡尾迹, 故对床面的冲蚀影响范围较小, 因此, 经过两个小时的冲刷, 在床面上只形成柱下方较柱径略宽的如图 4 所示的冲蚀型面。当 $e/D \neq 0$ 时, 绕流情况就与 $e/D=0$ 很不相同了。 $e/D \neq 0$ 时临界 K_c 数增大, 流动中形成了尾迹流的振荡, 由图 6(b) 可见, 床砂的起动首先发生是因尾迹涡对床面的冲刷, 进入水体的淤泥颗粒随振荡流尾迹的摆动在圆柱与床面间隙间来回运动, 还可以见到在主尾迹涡之间淤泥床表面的不规则雾状扬起, 反映出尾迹已具湍流特

征，这与图 5 照片中床面冲蚀图象在柱下方和在柱两侧所见不同可以对照，柱下方为层流冲蚀而尾迹区为湍流冲蚀。

3 结 论

(1) 对淤泥床实验得到了在临界冲蚀条件下圆柱与床面初始间隙随振荡流 K_c 数的变化规律。

(2) 圆柱的存在使床面开始起动的来流速度幅值下降，起动速度随淤泥容重的增大而增大。

(3) 淤泥床面冲蚀图象类型的不同是圆柱与床面初始间距不同时分离旋涡流动类型不同所致。

参 考 文 献

- 1 约翰 B·赫比希. 海底管线设计原理, 董启贤, 北京: 石油工业出版社, 1988.
- 2 Sumer B M, Jensen B L, Fredsoe J. Effect of a plane boundary on oscillatory flow around a circular cylinder, *J. Fluid Mech.*, 1991, 225:271-300.
- 3 王兆印, 宋振琪. 欧美泥沙运动研究述评, 第二届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集, 北京: 中国建材工业出版社, 1995, 3—27.
- 4 Sumer B M, Fredsoe J. Scour below pipelines in waves, *J. Waterway, Port, Coast-al and Ocean Eng.*, ASCE, 1990, 116(3):307-323.
- 5 Gokce K T, Gunbak AR. Self burial and stimulated self burial of pipelines by waves, 1st Int. Conf. on Offshore and Polar Eng., ISOPE, Edinburgh, 1991, 308-314
- 6 浦群, 李坤. 振荡流中管线下方的砂床冲蚀, 第五届全国实验流体力学学术会议论文集, 四川松潘, 1995, 275—281.

Scour of Mud Bed under a Circular Cylinder in Oscillating Flow

Pu Qun Li Kun

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

Abstract The scour of the mud bed under a circular cylinder in oscillating flow is studied experimentally at different cylinder diameters and different initial gaps between cylinder and bed. The relationship between critical initial gap above which no scour occurs and K_c number of the oscillating flow is obtained in this test. Due to the different seperated oscillating flow patterns around the circular cylinder at different initial gaps, the different scour patterns are formed on the surface of the mud bed.

Key words oscillating flow; scour; flow around a circular cylinder; mud bed; scour pattern