

管线振荡绕流对砂床的冲蚀^{1), 2)}

浦 群 李 坤

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 采用轻质模型砂在带砂槽的 U 型振荡水槽中对振荡流中管线下方的砂床冲蚀进行了实验研究, 给出了管线下方砂床的平衡冲蚀深度随 Kc 数的变化规律以及发生冲蚀的临界 e/D 和 Kc 的相关, 并指出管线的存在使砂床开始形成砂坑相应的振荡流临界振幅值下降.

关键词 振荡流, 管线, 砂床, 冲蚀

引 言

海底管线长期处于海洋风浪流的恶劣环境条件之下, 管线附近的泥沙在环境条件作用下形成局部冲蚀, 改变了管线的受力状态, 引起管线断裂和疲劳破坏, 带来巨大的经济损失. 管线周围的冲蚀是个复杂的问题, 在床面冲蚀过程中, 管线、水流、床质相互作用, 处于一动态过程之中, 影响因素多, 现象复杂, 涉及旋涡分离流、两相流、泥沙运动、流固土三者耦合作用等许多目前正处于研究前沿的问题, 其机理尚未完全认识清楚. 冲蚀有时还可引起管线自埋, 这一现象因为可以节省人工挖沟或埋管的花费在工程上受到关注.

在工程需要的推动下, 许多学者对于海底管线的泥沙冲蚀作了大量研究, 探讨各种影响因素及其规律, 并提出了一些管线下方平衡冲蚀深度的工程估算公式^[1~8], 如前所述, 由于问题复杂, 现有公式在考虑因素等方面不一致, 需要更多的实验检验及实际考核. 冲蚀机理的研究也需要深入.

本文采用带砂槽的 U 型振荡水槽对振荡流中管线下方的砂床冲蚀进行实验研究, 探讨冲蚀的发生及其规律.

1 设备、模型和测量

试验在带砂槽的 U 型振荡水槽中进行, 参见图 1. U 型振荡水槽为抽气式, 由蝶阀控制实现周期振荡, 周期为 2.59 s. 弯段采用型线设计以保证实验段两端截面流速均匀. 实验段尺寸为 $200 \times 200 \times 800$ (mm)³, 砂槽置于实验段下方, 尺寸为 $35 \times 200 \times 600$ (mm)³.

管线模型采用两种圆柱形有机玻璃棒, 直径分别为 $D = 28.9$ mm 及 $D = 19.1$ mm, 表面光滑.

砂粒采用磺酸型阳离子交换树脂, 粒径为 $d_{50} = 0.68$ mm, 比重 $\gamma = 1.42$, 粒子清洗晾干后备用. 试验时砂粒填满砂槽并刮平, 使得无冲蚀时试验段进出口水流保持均匀.

1999-05-28 收到.

1) 国家自然科学基金资助项目 (19772065), 中科院“九五”重大项目“KZ951-A1-405”支持.

2) 谨以本文纪念林同骥院士 80 周年诞辰.

试验时测量模型离床面的距离,同时记录相应的振幅,在试验段侧面照相记录床面的形态.一般经过半小时左右,管线下方冲蚀深度不再加深、表明床面冲蚀已处于动平衡状态,记下平衡冲蚀深度.

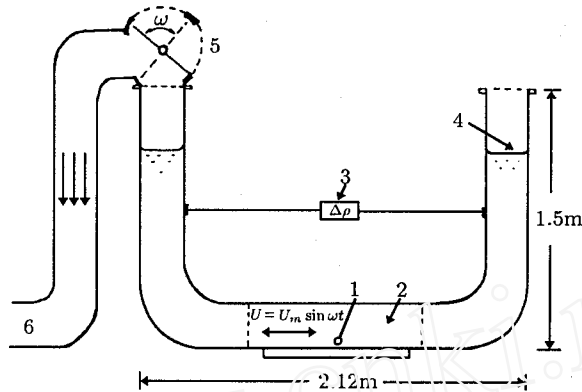


图 1 实验设备示意图

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

Fig.1 A schetch of experimental apparatus

1. model 2. test section with a sand box 3. a differential present transducer

4. water level 5. a butterfly-value 6. wind tunnel connected with an air blower

由于砂槽的长度与深度的限制,实验的 Kc 数限制在一定范围内. 振荡流动的 Kc 数定义为

$$Kc = \frac{U_m T}{D} \quad (1)$$

其中 T 为振荡周期, D 为管径, U_m 为振荡来流的速度振幅, $U = U_m \sin \omega t$, 其中 ω 为角频率. 雷诺数定义为

$$Re = \frac{U_m D}{\nu} \quad (2)$$

ν 为水的运动粘性系数. 相应振荡来流的希尔兹数定义为

$$\theta = \frac{U_{fm}^2}{g(\gamma - 1)d_{50}} \quad (3)$$

γ 为砂的比重, d_{50} 为砂的粒径, g 为重力加速度, U_{fm} 为相应振荡来流的摩擦速度的最大值, $U_{fm} = \sqrt{f/2}U_m$, f 为波流边界层的摩擦系数,可按文 [9] 的计算曲线或所引实验结果拟合曲线查得.

2 结果和讨论

在无量纲管线与床面初始距离 $e/D = 0 \sim 1.003$, 振荡流动 $Kc = 2.17 \sim 31.91$, 雷诺数 $Re = 3.9 \times 10^2 \sim 7.59 \times 10^3$, $\theta = 0.3 \times 10^{-4} \sim 0.44 \times 10^{-3}$ 的范围内进行了实验, 主要结果讨论如下:

2.1 冲蚀的发生

当管线距未冲蚀床的无量纲初始位置 $e/D = 0$ 时, 管线下方冲蚀发生的过程与文 [2] 描述的类似. 即当振荡流速足够大时首先形成通道冲蚀 (tunnel erosion), 通道两头砂粒形成少量堆

积, 远处的砂床不发生床面变形, 参见图 2(a). 随着管线与床面初始无量纲距离的增加, 冲蚀发生的情况有所不同. 由于管线的存在, 管线下方的局部流速要大些, 当振荡流速大到一定值时, 管线下方的砂粒因局部剪应力大于砂粒的起动剪应力而开始在小范围内沿床面发生滚动, 实验中可以看到当柱下仅有一层砂粒发生滚动时, 柱下方并无冲蚀坑出现. 继续加大振荡速度, 柱下出现 2~3 层粒子翻滚时, 柱的下方有少量砂粒堆积, 堆积处外侧略见下陷, 远处床面不受扰动, 参见图 2(b). 两种不同的冲蚀发生情况主要是管线与床面位置不同时局部绕流状态不同之故.

2.2 平衡冲蚀深度

无量纲平衡冲蚀深度 S/D 随 Kc 数变化的实验结果可用

$$S/D = Kc^{1.46} \quad (4)$$

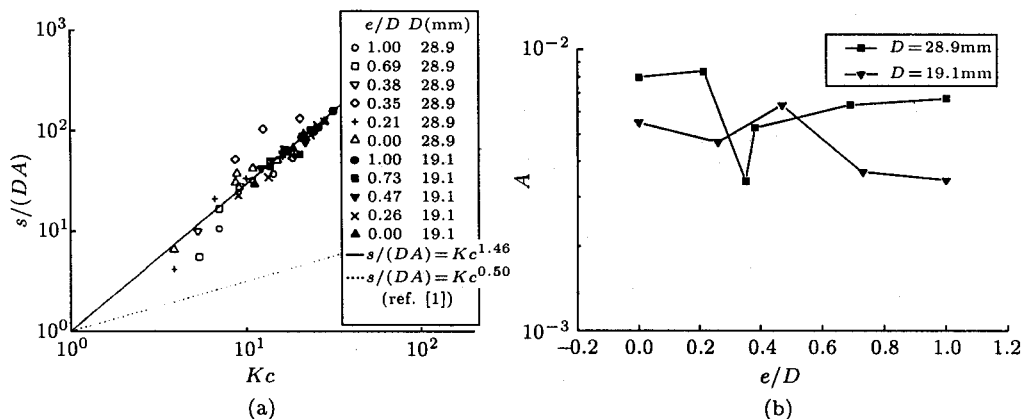


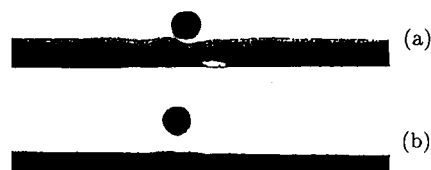
图 3 平衡冲蚀深度随 Kc 数的变化

Fig.3 The equilibrium scour depth as a function of Kc

较好地拟合, 见图 3(a) 所示. 在图中虚线为文 [1] 所给的经验公式. 与它相比较, 文 [1] 所给公式中 $A = 0.1$, 而本拟合式中 A 是随 D 和 e/D 不同而不同的常量, 见图 3(b) 所示. 由图可见, A 随 e/D 并不单调变化, 在 $e/D \approx 0.2 \sim 0.6$ 的范围内变化较大, 但其值无量级变化, 原因尚待深入分析研究, 因此进一步研究不同条件下随冲刷发生发展而变化的绕流流场结构很有必要. 在图 3(a) 中 $S/(DA)$ 随 Kc 变化的斜率与文 [1] 不同, 我们认为主要由床质不同所致.

2.3 临界冲蚀参数

前面已提及对于给定的管线离床面初始位置, 冲蚀的发生要在 Kc 数大于一定值时才发生. 将实验中柱下一层砂粒滚动的状态作为冲蚀发生的临界状态, 相应的 e/D 与 Kc 数的结果



(a) $e/D = 0$, $Kc = 3.91$, $Re = 1.25 \times 10^3$,
 $\theta = 0.61 \times 10^{-4}$, $D = 28.9$ mm
 (b) $e/D = 0.73$, $Kc = 8.22$, $Re = 1.14 \times 10^3$,
 $\theta = 0.89 \times 10^{-4}$, $D = 19.19$ mm

图 2 $e/D = 0$ 和 $e/D \neq 0$ 时的初始冲蚀

Fig.2 Onset of scour at $e/D = 0$ or $e/D \neq 0$

给于图 4. 所给结果初步可用下式拟合:

$$(e/D)_{cr} = 2.20 \log Kc - 0.88$$

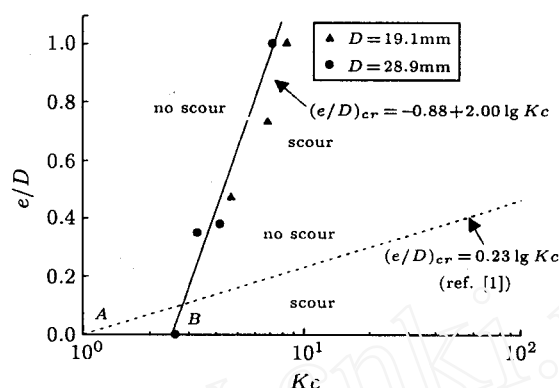


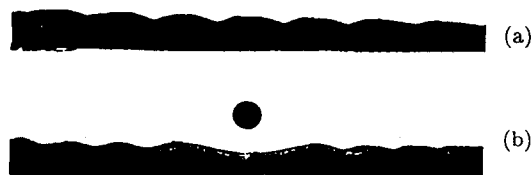
图 4 临界管线与床面无量纲间距与 Kc 数的相关

Fig.4 The relationship between the critical non-dimensional gap and Kc number

与文 [2] 中部分埋地管线的结果相对照, 可发现状态相同的 A 和 B 两点结果不重合, 反映出起动 Kc 随床质不同而不同.

2.4 管线对砂波形成的影响

当砂床上方没有管线存在时, 在外部振荡流动的作用下, 当水流强度达到一定程度时床砂开始运动, 随振荡流速继续增强, 床面发生明显变形, 逐步形成规则的砂波, 见图 5(a) 所



(a) no pipeline, $A_{mcr}/k = 31.22$, (b) $D = 28.9$ mm $e/D = 0.69$, $A_{mcr}/k = 19.7$

图 5 管线对砂波出现的影响

Fig.5 Effect of pipeline on presence of sand wave

示. 在实验的床砂条件下, 出现砂波的临界外部流动振幅与床面粗糙度 (取 $k = 2.5d_{50}$) 之比 $A_{mcr}/k = 31.32$. 当管线置于砂床上方时, 管线下方随振荡流速增大出现冲蚀, 随着速度继续增大, 床面的变形由管线所在位置向两边传递, 床面的变形象是波动能量在砂床中边传播边消耗, 所以起初远处的床面是保持不变的. 但当速度达到某一临界值时, 象前面无管线情况那样, 床面迅速形成规则的砂波, 只是在管线附近砂波有局部的变形, 典型结果见图 5(b) 所示. 实验中发现由于管线的存在使 A_{mcr}/k 值有所下降. 对不同柱径及 e/D 均如此.

3 结 论

1. 采用轻质模型砂进行的离地管线下砂床冲蚀实验发现管线离地和埋地的冲蚀开始形成的现象有所不同, 并给出了离地管线发生冲蚀的临界 e/D 和 Kc 的变化规律.

2. 在 $e/D = 0 \sim 1$, $Kc = 3.9 \sim 31.9$ 的范围内给出了平衡冲蚀深度 s/D 与 Kc 数的初步相关规律.
3. 管线的存在使振荡流中砂床开始形成砂波所对应的临界 A_{mcr}/k 值有所一降.

参 考 文 献

- 1 Sumer BM, Fredsoe J. Scour below pipelines in waves. *J Waterway Port, Coastal and Ocean Eng, ASCE*, 1990, 116(3): 307~323
- 2 Sumer BM, Fredsoe J. Onset of scour below a pipeline exposed to waves. *Int J of offshore and Polar Eng*, 1991, 1(3): 189~194
- 3 Kjeldsen SP. Experiments with local scour around submarine pipelines in a uniform current. SINTEF Report STF60 A73085, 1974
- 4 约翰 B 赫比希. 海底管线设计原理. 石油工业出版社, 1988
- 5 Gokce KT, 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 Stansby PK, Starr P. On a horizontal cylinder resting on a sand bed under waves and currents. *Inter J of Offshore and Polar Eng*, 1992, 2(4): 262~266
- 7 Gokce KT. Effect of sand size on the mode of scour for pipelines exposed to waves. Proc 2nd Conf on Offshore and Polar Eng, ISOPE, San Francisco, 1992. 2: 86~91
- 8 Westerhorstmann J H, Machemehl J L, Jo C H. Effect of pipe spacing on marine pipeline scour. Proc 2nd Conf on Offshore and Polar Eng, ISOPE, San Francisco, 1992. 2: 101~109
- 9 Fredsoe J. Turbulent boundary layer in wave-current Motion. *J Hyd Eng, ASCE*, 1984, 110(8): 1103~1120

SCOUR OF THE SAND BED BELOW THE PIPELINE IN
OSCILLATING FLOW ^{1),2)}

Pu Qun Li Kun

(Institute of Mechanics, Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The Scour of the bed below a pipeline in oscillating flow is studied experimentally in a U-Shaped water tunnel with a sand box at the bottom of the test section. The artificial plastic sand is used as bed material. The relationship between the maximum equilibrium scour depth and Kc number, and the relationship between the critical gap above which no scour occurs and Kc number are obtained. It is shown in this test that the critical amplitude in the presence of the pipeline at which the sand wave is formed is smaller than the one when the pipeline is absent.

Key words oscillating flow, pipeline, sand bed, scour

Received 28 May 1999.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (19772065) and the Key Project (KZ951-A1-405) of "Ninth Five-year Plan" of CAS.

2) In memory of academician Lin Tongji's 80 anniversary.