

水流作用下海底管线三维冲刷扩展速度实验研究

臧志鹏¹, 滕斌^{*1}, 程亮², YEOW Kervin²

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 西澳大利亚大学 土木资源工程系, 佩斯 WA6009)

摘要: 对水流作用下海底管线三维冲刷问题进行了实验室研究, 重点研究了不同的水流速度(以底面剪切力系数 θ 表示, $\theta=0.046\sim 0.104$)、管线埋厚比 ($e/D=0.1\sim 0.5$)、水流作用角 ($\alpha=45^\circ\sim 90^\circ$) 下的冲刷沿管线扩展速度. 实验结果表明管线下方向冲刷以先后两个速度沿管线向两侧扩展. 建立起冲刷段扩展速度 v_h 与 θ 、 e/D 、 α 等影响因素间的关系. 发现管线冲刷的扩展速度随底面剪切力系数的增大而增大; 随着埋厚比的增大而减小, 随水流作用角的增大而增大. 最后, 根据实验结果建立了一套预测海底管线下方向冲刷段扩展过程的经验模型, 效果较好.

关键词: 海底管线; 三维冲刷; 扩展速度; 稳态水流

中图分类号: P75 **文献标志码:** A

0 引言

海底管线是承载通信光缆、输送海上油气的重要途径, 一旦发生事故将会造成巨大的经济损失. 冲刷是造成海底管线破坏的一个重要原因. 冲刷会在管线下方向形成一个悬空段, 如果悬空段过长, 管线会在重力作用下发生下沉甚至断裂, 以及在涡激振荡作用下发生疲劳破坏. 因此对海底管线三维冲刷的研究具有重要的学术及工程意义.

在过去的一二十年里, 许多学者对海底管线局部冲刷问题进行了大量研究工作, 但基本限于对二维冲刷的研究. 文献[1~4]对水流及振荡流作用下的海底管线局部二维冲刷进行了实验研究, 表明渗流、管涌以及尾涡侵蚀是管线二维冲刷启动并发展的主要原因, 并且确定了管线下方向冲刷平衡剖面及最大冲刷深度. 在对二维冲刷机理充分认识的基础上, 一些相应的数值模型应运而生, 文献[5、6]等发展的二维冲刷模型已经相当成熟并且得到了广泛应用. 对于管线三维冲刷问题的探索, 只有文献[7]对管线在冲坑中的下沉及自埋过程进行了描述. 到目前, 还没有一套合理的模

型能够对管线下方向由于冲刷引起的悬空段的长度进行预测, 本文通过模型实验对水流作用下冲刷沿管线扩展过程进行研究.

1 实验设置和实验条件

实验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室非线性波浪水槽中进行, 水槽尺寸为 $50\text{ m}\times 4\text{ m}\times 2.5\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高), 实验布置如图 1. 实验有效水深恒定在 0.45 m , 一段 4 m 长的管线模型水平放置在厚度为 0.25 m 的沙坑中, 沙坑两侧设置坡度为 $1:20$ 的地形. 管线模型直径 $D=50\text{ mm}$, 材料选用表面光滑的有机玻璃管. 30 组长度为 80 mm 的可导冲刷探针以 120 mm 的间距沿轴线安装在管线上(图 2), 用于实时记录冲刷全过程. 冲刷探针的工作原理是利用两根相邻很近的不锈钢丝在水中和饱和沙中导电性的差异, 通过输出电压来表示探针在水中部分的长度, 从而确定冲刷深度. 通过标定发现此探针系统的精度为 $\pm 0.5\text{ mm}$, 这一精度满足当前实验要求. 当水流与管线倾斜作用时(作用角 α 定义如图

收稿日期: 2006-03-04; 修回日期: 2008-01-04.

基金项目: 国家杰出青年科学基金-海外青年学者合作研究基金资助项目(50428908).

作者简介: 臧志鹏(1981-), 男, 博士生, E-mail: zangzhip@163.com; 滕斌*(1958-), 男, 教授, 博士生导师; 程亮(1961-), 男, 教授, 博士生导师.

3),需要在原始段管线两端套接一段相同规格的有机玻璃管,然后延长再将其两端固定在水槽壁附近的预埋螺栓上.

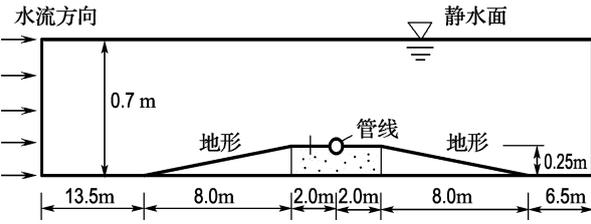


图 1 实验水槽布置

Fig. 1 Experimental set-up in flume

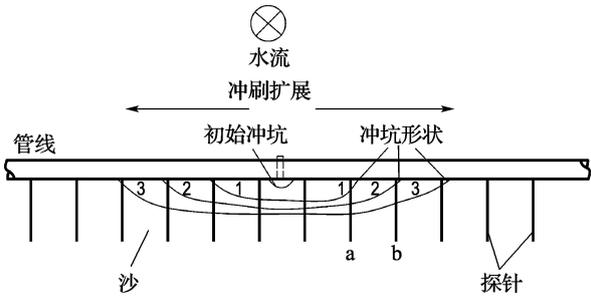


图 2 冲刷探针布置

Fig. 2 Set-up of scour probes

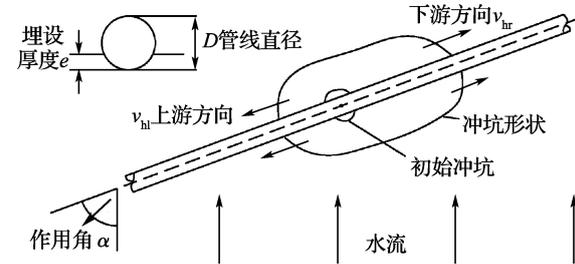


图 3 水流与管线作用角

Fig. 3 Attacking angle between current and pipeline

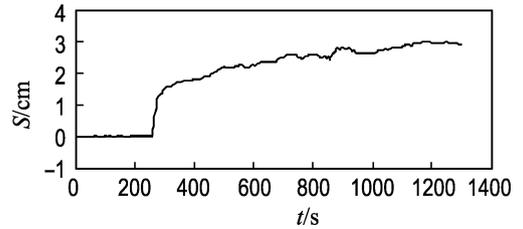
每组实验前,需要将管线周围的沙床整平,确保管线埋设厚度精确.实验时,先在管线中间部位的沙床挖一个小洞,作为初始冲刷坑(如图 2),允许冲刷从此处开始向两侧扩展. ADV 流速仪被安放在管线上游位置,实时测量底面流速.

2 实验条件与实验结果

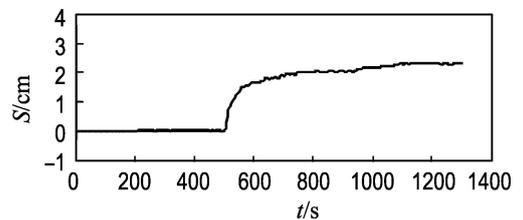
实验中采用了中值粒径 $d_{50} = 0.37 \text{ mm}$ 的石英砂,对不同底面剪切力系数 θ (由水流速度决定)、埋厚比 e/D 和水流作用角 α 下的管线三维冲刷过程进行测量记录. 实验中水流速度取值为 $0.28、0.33、0.37、0.42 \text{ m/s}$,其相应的底面剪切力

系数 θ 分别为 $0.046、0.064、0.081$ 和 0.104 ;管线埋厚比 e/D 以 0.1 为间隔由 0.1 逐步增加至 0.5 (如图 3, e 为管线的埋设厚度, D 为管线的直径);水流作用角 α 取值分别为 $90^\circ、75^\circ、60^\circ、45^\circ$ (如图 3 所示),研究共进行了 80 组次实验.

实验记录的数据形式为各组探针测得的其所在位置处冲刷深度的时间历程曲线,冲刷沿管线的水平扩展速度 (v_h) 将通过对所有探针的数据进行分析而得到. 图 4 列举了两个具有代表性的数据曲线(图 2 中 a、b 探针数据, a、b 为两个相邻的探针,间距为 12 cm),曲线的纵坐标为各时刻所对应的冲刷深度 S . 从图中可以看到,每一支数据曲线都包括 3 个阶段,即最初的水平段、中间的上升段和最后的稳定段. 曲线的开始阶段基本都保持在 0 左右,说明此处的冲刷没有发生;在某一时刻曲线突然发生变化,由 0 开始并迅速增大,表明此点处的冲刷已经发生,管线下的冲刷坑已经扩展至此处;随着时间的推移,曲线变化逐渐减慢,并最终趋于稳定,表明此处管线下方冲刷达到了平衡. 从图 4 中可以看到, a 探针数据曲线发生突变的时刻比 b 探针要早,对应图 2 中探针位置可以发现 a 探针比 b 探针更加靠近初始冲刷坑,因而较早发生了冲刷.



(a) a 探针



(b) b 探针

图 4 冲刷深度时间历程 ($e/D=0.4$, $\theta=0.064$, $\alpha=90^\circ$)

Fig. 4 Time history of scour depth ($e/D=0.4$, $\theta=0.064$, $\alpha=90^\circ$)

用各个探针的位置坐标与其冲刷开始时刻建立坐标系,曲线的斜率即代表冲刷扩展速度(如图5)。由于初始冲刷坑位于管线中间部位,文中将冲刷向左右两个方向(对于倾斜情况则为顺流方向和逆流方向)扩展速度分别计算.通过对冲刷扩展过程的分析,发现绝大多数情况下冲刷沿管线扩展过程中都存在着先后两个不同的速度阶段,从图5中也可以看到,在冲刷扩展的初期阶段,管线下方的冲刷以一个较大的速度沿着管线均匀扩展;在某一时刻,冲刷扩展速度发生了明显的变化,在此之后冲刷以一个较小的速度扩展.本文将冲刷初期的冲刷扩展速度称为初级速度,而扩展较慢阶段相应的扩展速度称为次级速度.

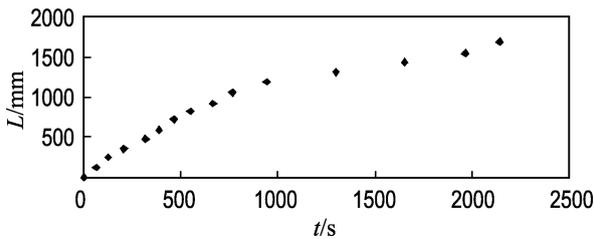


图5 冲刷沿管线扩展过程($e/D=0.4$,
 $\theta=0.064$, $\alpha=90^\circ$)

Fig. 5 Process of scour propagation along pipeline
($e/D=0.4$, $\theta=0.064$, $\alpha=90^\circ$)

冲刷扩展过程中存在着两个不同的速度阶段是与其冲刷机理紧密相关的,在冲刷的初级阶段,由于管线下方的过流面积较小,管线上游压力较大,水流以很快的速度流过冲刷区域,产生了强烈的紊动效应,尾涡侵蚀作用明显,冲刷以一个较快的速度向两侧扩展;而随着时间的推移,管线下方的过流面积逐渐增大,水流的紊动效应减弱,减缓了冲刷的扩展速度,扩展过程转变为次级阶段.实验分析中发现,有些情况下,冲刷扩展速度变化不明显,这仅限于管线埋深很浅($e/D < 0.2$),且水流速度相对较大的情况.这种现象是由于较浅的埋深使泥沙极易发生冲刷,同时由于管线上下游较大的压力差,产生了类似于管涌的效应,冲刷沿着管线以一个很大的速度扩展,此时的冲刷扩展应为两阶段扩展中的初级扩展.整理后的冲刷扩展速度结果请参照文献[8].

研究发现冲刷扩展速度与底面剪切力系数

θ 、管线埋厚比 e/D 和水流作用角 α 等参数都密切相关.冲刷扩展速度随底面剪切力系数的增大而增大;随管线埋厚比的增大而减小.当水流垂直作用于管线时($\alpha=90^\circ$),由于水流的对称性,冲刷沿管线左右两个方向上扩展速度近似相等;当水流倾斜作用于管线时,冲刷在管线两个方向上的扩展速度会产生明显的不同,通常会在顺流方向扩展较快,而在逆流方向扩展较慢($v_{hr} > v_{hl}$,图3);在某些水流作用角度较小的情况下($\alpha=45^\circ$),冲刷在逆流方向的扩展停止,甚至发生回填现象.这是因为当水流倾斜作用于管线时,对冲刷的影响是综合的,水流在管线垂直方向的分量产生的冲刷效果,等同于前面叙述的水流垂直管线的情况,形成的尾涡侵蚀,对冲刷的扩展起主导作用;水流沿管线长度方向的分量,对冲坑下游肩部产生掏空侵蚀(类似于水流对垂直桩柱的冲刷),对冲坑上游肩部处则产生回填效应,这样倾斜水流的综合作用使冲刷在顺流方向比逆流方向扩展要快,当水流作用角度足够小时,则在冲坑上游方向的综合效应为回填.由于垂直于管线方向的水流分量在冲刷扩展中占据主导地位,相同条件下的冲刷扩展速度随着水流作用角 α 的增大而增大.

3 冲刷扩展模型建立及验证

本文通过对各组实验数据的分析整理,以及考虑各影响因素的综合作用效果,建立了一套用于预测海底管线下冲刷扩展过程的经验模型,冲刷扩展速度可由如下公式计算:

$$v_h = K \left(25 \frac{\sqrt{g(s-1)d_{50}^3} \theta^{5/3}}{D \tan \beta} \left(1 - \frac{e}{D} (1 \pm \cos \alpha) \right) \right) \quad (1)$$

式中: v_h 代表冲刷扩展的初级和次级速度; β 为泥沙的自然休止角; α 为水流作用角,当水流垂直于管线时, $\alpha=90^\circ$;当水流倾斜作用于管线时,顺流方向的扩展速度在式(1)“ \pm ”中取“ $-$ ”,在逆流方向取“ $+$ ”; K 为拟合得到的经验系数,代表环境因素对冲刷扩展的综合影响,取值由实验决定,对于动床冲刷问题, K 对应于初级速度和次级速度的取值分别为 14 和 4.

本文利用式(1)对管线冲刷扩展的初级速度

和次级速度进行了预测,并与实验结果进行了比较.图6为经验公式预测的冲刷初级扩展速度与实验值的比较($\alpha=90^\circ$),从图中可以看到,本文的预测结果与实验结果吻合很好.同时可以直观地观察到,冲刷扩展速度随底面剪切力的增大而增大;随埋厚比的增大而减小,且呈线性递减趋势.图7和图8为水流倾斜作用时($\alpha=75^\circ$)的预测结果和实验结果的比较,二者结果吻合也比较

好,此时的冲刷扩展速度要小于水流垂直于管线时的速度,且冲刷在逆流方向比在顺流方向扩展的速度要小.

管线下的冲刷扩展过程存在两个阶段,即初级扩展和次级扩展, t_t 为两个扩展阶段的转折点,可以根据文献[4]的经验公式确定,并假设此时冲坑深度 S 达到 97% 的最大冲坑深度 S_0 ,公式如下:

$$S = S_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t_t}{T}\right) \right) \quad (2)$$

其中 T 为二维冲刷的时间历程,计算如下^[4]:

$$T = \frac{D^2}{(g(s-1)d_{50}^3)^{1/2}} \frac{1}{50} \theta^{-5/3} \quad (3)$$

因此,在计算 $t < t_t$ 时间段内冲刷的扩展时应采用初级扩展;当 $t > t_t$ 时,冲刷扩展采用次级速度进行计算.图9给出了管线冲刷扩展过程的预测值和实验值比较,从图中可以看到,预测结果与实验结果吻合较好,证明了本模型可以较为准确地预测水流作用下海底管线冲刷扩展.

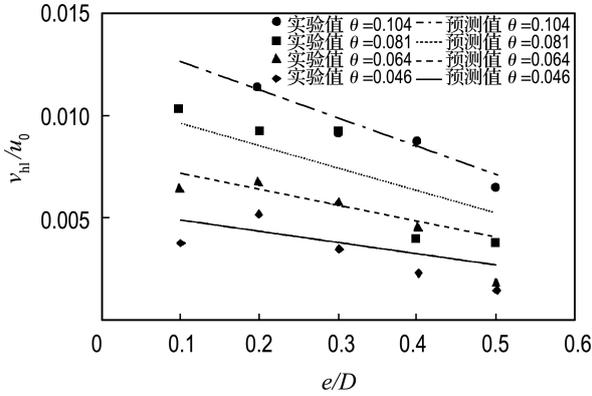


图6 冲刷扩展的初级速度

Fig. 6 Primary velocity of scour propagation

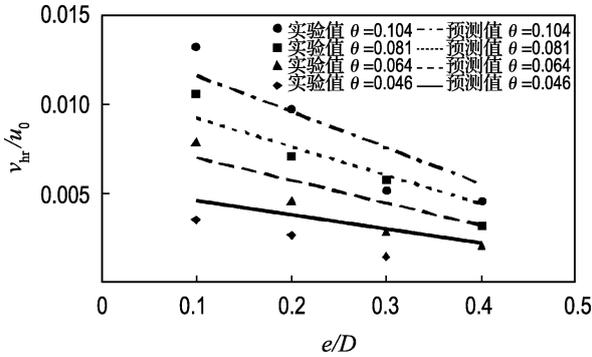


图7 冲刷顺流扩展的初级速度

Fig. 7 Primary velocity of scour downstream propagation

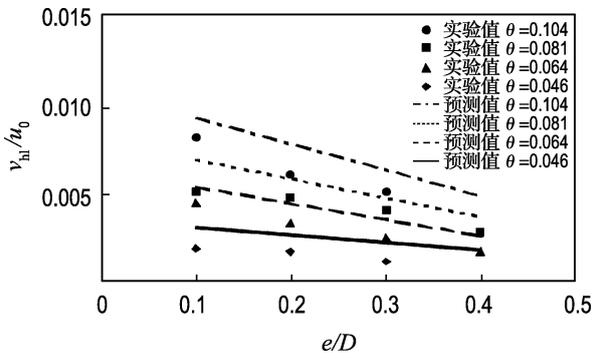


图8 冲刷逆流扩展的初级速度

Fig. 8 Primary velocity of scour upstream propagation

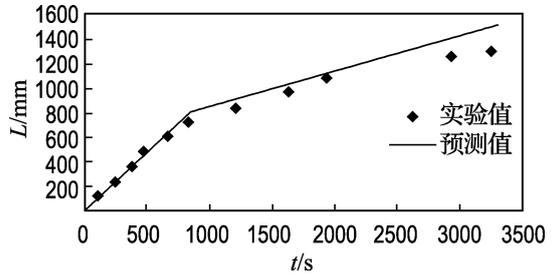


图9 冲刷扩展过程预测值与实验值的比较 ($\theta=0.046, e/D=0.3, \alpha=90^\circ$)

Fig. 9 Comparisons of predicted and experimental results of propagation ($\theta=0.046, e/D=0.3, \alpha=90^\circ$)

4 结 论

(1)水流作用下,海底管线下冲刷沿管线的扩展过程基本可以分为两个阶段:初级扩展和次级扩展,其相对应的扩展速度为初级速度和次级速度.

(2)冲刷扩展过程逐渐减慢,这是由于管线下方的过流面积随冲刷的扩展逐渐增大,水流的紊动效应减弱,减缓了冲刷的速度.

(3)冲刷扩展速度随底面剪切力的增大而增大;随管线埋厚比的增大而减小;随水流作用角的

增大而增大. 水流倾斜作用于管线时, 冲刷在顺流方向比逆流方向扩展得快.

(4) 本文建立的经验模型可以比较准确地预测水流作用下海底下冲刷扩展过程.

参考文献:

[1] MAO Y. The interaction between a pipeline and an erodible bed [D]. Denmark: Technical University of Denmark, 1986

[2] CHIEW Y M. Mechanics of local scour around submarine pipeline [J]. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 1990, **116**(4):515-529

[3] 杨兵, 高福平, 吴应湘. 海流引起的海底管道周围砂质海床局部冲刷 [J]. *中国造船*, 2004, **45**(z1): 281-288

[4] FREDSTØJ E J, SUMER B M, ARNSKOV M. Time scale for wave/current scour below pipeline [J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 1992, **2**(2):13-17

[5] LI F, CHENG L. Numerical model for local scour under offshore pipelines [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, **125**(4):400-406

[6] 李玉成, 吕林. 海底管线附近底床侵蚀平衡剖面的湍流数值模拟 [J]. *中国造船*, 2004, **45**(z1):209-216

[7] SUMER B M, FREDSTØJ E J. *The Mechanics of Scour in the Marine Environment* [M]. Singapore: World Scientific, 2002

[8] 臧志鹏. 海底管线三维冲刷实验研究及数值模拟 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008

Experimental research on propagation velocity of 3-D scour of pipelines on sea floor under action of currents

ZANG Zhi-peng¹, TENG Bin^{*1}, CHENG Liang², YEOW Kervin²

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Department of Civil and Resources Engineering, University of Western Australia, Perth WA6009, Australia)

Abstract: The 3-D scour of pipelines on sea floor in steady current is investigated by experiments. The major emphasis of the investigation is on the scour propagation velocities along the pipeline at different flow speeds (in term of Shields parameter θ , $\theta = 0.046-0.104$), embedment depth ($e/D = 0.1-0.5$) and attacking angle of flow ($\alpha = 45^\circ-90^\circ$). It can be concluded that scour propagates along the pipeline at two constant rates after initiation. The relationship between propagation velocity v_h and some flow parameters including $\theta, e/D$ and α are founded. Scour propagation velocities generally increase with the increase of Shields parameter and attacking angle, but decrease with the increase of the pipeline embedment depth. An experiential equation is proposed to predict the propagation of 3-D scour of pipelines on sea floor in steady current and validated against the experimental results. And both results are in good agreement.

Key words: pipeline on sea floor; 3-D scour; propagation velocity; steady current