

程永舟,鲁显赫,李小超,等. 斜向波作用下斜坡海床上管线三维冲刷不平衡性研究[J]. 海洋学报, 2016, 38(7): 126—134, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2016.07.012

Cheng Yongzhou, Lu Xianhe, Li Xiaochao, et al. The malconformation research of 3D scour below submarine pipelines under the oblique waves[J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(7):126—134, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2016.07.012

斜向波作用下斜坡海床上管线三维冲刷不平衡性研究

程永舟^{1,2}, 鲁显赫¹, 李小超^{1,2*}, 易蕾¹, 胡有川¹

(1. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410004)

摘要: 由于海床起伏不平, 斜坡的存在必然改变波浪对管线及海床的作用特性, 进而影响管线三维冲刷。基于波浪港池实验, 考虑规则波的作用, 采用中值粒径为 0.22 mm 的原型沙铺设与波浪传播方向成 45° 夹角的斜坡, 研究斜向波作用下斜坡上海底管线的三维冲刷特性。通过测量管线下冲刷坑宽度和深度的差异, 分析管线三维冲刷的不均衡性。实验表明: 管线的存在使斜坡上的波高有所降低; 斜向波作用下管线三维冲刷的不均衡性表现为深度不均衡性和宽度不均衡性, 宽度不均衡性主要是管后淤积泥沙的后移引起的, 周期对三维冲刷不均衡性的影响比波高对其的影响程度大; 管线自深海向近岸延展时, 随水深的减小, 冲刷深度分为缓慢发展阶段和快速发展阶段。

关键词: 海底管线; 冲刷; 斜坡海床; 斜向波

中图分类号: TV148⁺.5

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2016)07-0126-09

1 引言

随着经济的发展, 海底管线在海洋工程中的应用越来越广泛, 近岸带已成为海洋资源开发和建设的中心, 其重要性和安全性越来越为人们所关注。海底管线局部冲刷容易导致的海底管线悬空进而影响管线的安全运营, 因此海底管线的局部冲刷引起了国内外学者和工程师的广泛关注。

很多学者针对管线的冲刷机理进行了大量的研究, 海流流经管线时在管线前后产生的涡流^[1]、管涌^[2]是引起管线冲刷的主要原因。臧志鹏等^[3]、Wu 和 Chiew^[4-5]、浦群和李坤^[6]对单流作用下的管线的冲刷机理开展了相应的研究。Sumer 和

Fredsoe^[7-8]、潘冬子等^[9]、夏令^[10]对波浪作用下平底海床上管线的冲刷进行了研究。Esin 和 Yalc^[11]通过规则波作用下, 对不同斜坡坡度的海底管线冲刷的研究, 利用修正 Ursell 数推导了斜坡上海底管线的冲刷深度的公式。Myrhaug 等^[12]基于 Esin 和 Yalc 的研究结果进一步推导了浅海区域海底管线在随机波条件下的冲刷深度新的计算方法。程永舟等^[13]通过改变斜坡上管线的位置, 分析了规则波作用下管线位置对冲刷坑深度、沙坝长度、高度和位置的影响。Cheng 等^[14]对波流共同作用下管线的冲刷坑沿管线的扩展速率进行了深入的研究。刘盈溢等^[15]推导了波流共同作用下管线的平衡冲刷深度的发展公式和悬跨长度的半经验公式。

收稿日期: 2015-12-07; 修订日期: 2016-03-17。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41176072, 51309038); 湖南省自然科学基金项目(2015JJ2006)。

作者简介: 程永舟(1974—), 男, 湖北省广水市人, 教授, 博士, 主要从事河流海岸动力学及泥沙运动方面研究。E-mail: chengyongzhou@163.com

* 通信作者: 李小超(1981—), 男, 湖南省郴州市人, 讲师, 博士, 主要从事水流与结构物相互作用的研究。E-mail: chao0735@qq.com

由此可见,目前关于海底管线冲刷机理的分析大都集中于水平海床上波浪正向入射时的情形,部分国内外学者开始注意到对斜坡海床上海底管线冲刷机理研究的必要性,但很少涉及斜向波作用下管线的冲刷情形。实际工程中,由于海床起伏不平,海底管线往往要经过不同坡度的海床,斜坡的存在必然改变波浪对管线及海床的作用特性,进而影响管线周围的冲刷过程。因此,有必要对波浪斜向入射斜坡时管线的冲刷机理进行系统研究。

2 试验概况

实验在长沙理工大学港航中心的港池中进行,港池长 40 m,宽 20 m,深 1.2 m,港池端头配有造波机。

如图 1 所示,斜坡位于港池中与造波机正对的一侧,斜坡长 10 m,宽 3.5 m,坡度为 1 : 15,为实现波浪斜向入射,斜坡坡脚线与波浪入射方向夹角为 45°。这样沿岸流和向岸—离岸流都比较明显的存在,可以很好地反映出波浪斜向入射斜坡时的水动力特性和地形演变情况。斜坡两侧用水泥进行抹面,中间铺设中值粒径为 0.22 mm 的泥沙。浪高测量采用加拿大 RBR(Richard Branker Research)公司生产的 WG-50 型浪高仪,采样误差为 0.4%,实验时浪高仪采样频率为 51.2 Hz,实验共布置了 10 个浪高仪。以造波机处为外海,斜坡为近岸,1[#]浪高仪位于外海,根据地形仪轨道的限制,结合实验区域的位置,建立如图 1 坐标系,2[#]~10[#]浪高仪的位置如表 1 所示。

表 1 浪高仪位置
Tab. 1 Wave probe location

浪高仪编号	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]	9 [#]	10 [#]
<i>x</i> /cm	-240	-102	4	110	216	124	230	336	442
<i>y</i> /cm	0	170	170	170	170	-60	-60	-60	-60
所在斜坡处水深/cm	35	13	18	23	28	13	18	23	28

实验中将多普勒流速仪(NDV)固定在模型实验多功能控制系统上,根据 NDV 测深功能,结合地形仪移动模式,实现对床面地形的测量^[16],可测量地形范围为下游 6 m×3.5 m。为减小边界影响,只研究中部 1.2 m 范围内的泥沙运动规律,以图 1 斜坡中部矩形区域作为地形分析区域,测得初始地形如图 2 所示。

选用 5.6 m 长的钢管作为管线模型,管线外径 48 mm,用 4 根螺杆将管线均分为 3 段固定于沙床底部的混凝土层,如图 3 所示。根据重力相似准则,考虑管线尺寸和海浪波高、周期的主要分布区间^[17],结合实验室造波机限制,实验水深设定为 0.35 m,实验工况如表 2 所示。

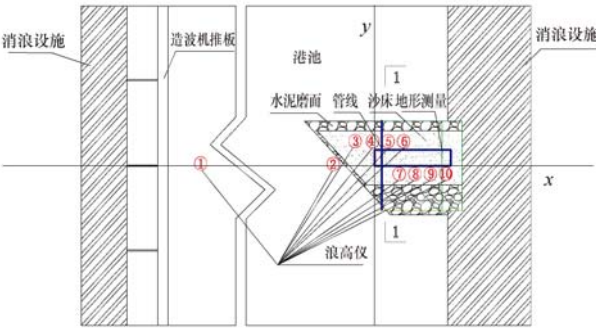


图 1 实验区域示意图

Fig. 1 Sketch of experimental area

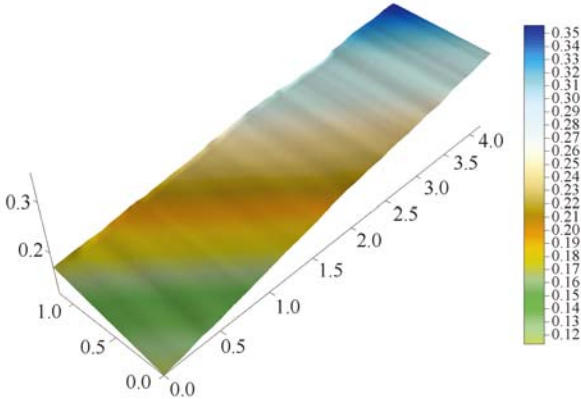


图 2 初始地形(单位:m)

Fig. 2 Initial terrain(Unit:m)

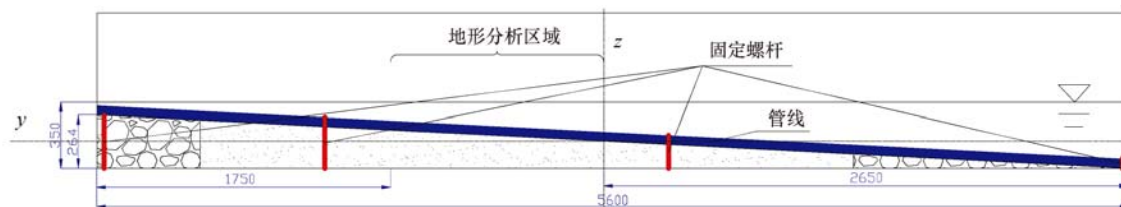


图3 1—1断面管线轴线垂向剖面图(单位:mm)

Fig. 3 Vertical profile of Section 1—1 pipeline axis(Unit:mm)

表2 试验工况

Tab. 2 Test conditions

工况	波高 H/cm	周期 T/s	管线与坡脚线的角度	工况	波高 H/cm	周期 T/s	管线与坡脚线的角度
1	5.58	1.4	无管	5	9.06	1.4	45°
2	4.39	1.4	45°	6	7.17	1.0	45°
3	5.58	1.4	45°	7	7.17	1.2	45°
4	7.17	1.4	45°	8	7.17	1.6	45°

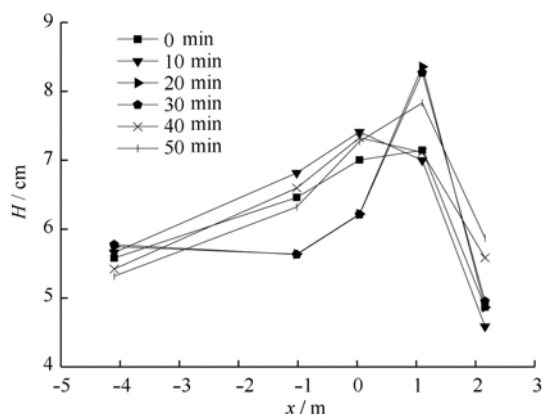
3 试验结果分析

3.1 波浪的浅水变形情况

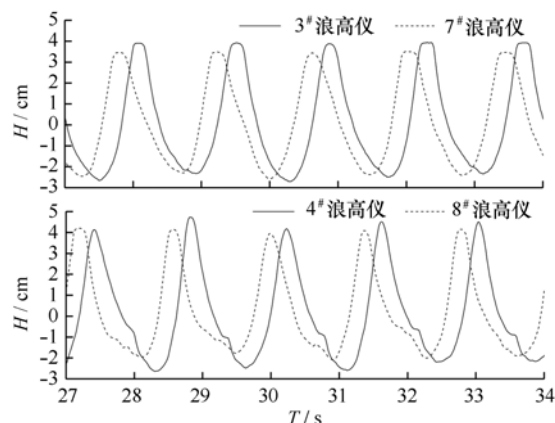
图4给出了波高沿波浪传播方向以及沿岸线的变化,由工况1在各个时间段的浪高平均值的变化情况看出:波浪传至斜坡,波高明显增加,在 $x=1.1\text{ m}$ 处,波浪接近破碎。

波浪斜向传至海岸时,辐射应力除了在垂直于岸线方向有分量外,还有平行于岸线方向的分量;波浪的增减水不但发生在波浪传播方向,也发生在平行于

岸线方向,这与平底海床及波浪正向入射斜坡有本质的区别。如图4b所示,3[#]浪高仪和7[#]浪高仪及4[#]浪高仪和8[#]浪高仪在相同高程处,波浪传播的差异所导致的相位差忽略不计,可以发现右侧(y 的负方向)浪高略低于左侧(y 的正方向),波峰略平缓于左侧。这是岸线方向的波浪增水引起的,右侧波浪增水现象较左侧更为显著,导致右侧水平面略高于左侧,则相同高程时,右侧水深略大于左侧,所以右侧波高增大的幅度没有左侧大。



a. 不同时刻时波高沿程变化



b. 浪高沿岸变化

图4 工况1波浪传播波变形情况

Fig. 4 Deformation of wave propagation in case 1

波浪斜向传至海岸时,海底管线的存在会对波浪传播产生一定的影响。图5给出了工况1和工况3下2[#]~6[#]浪高仪的波浪的变形情况及浪高的沿程变化情况。可以发现,波浪爬坡前波形吻合较好,管线的存在并没有使波高增加,反而使波高有所降低,5[#]浪高仪处波高降低最为明显,且并没有发生波浪破

碎。上述现象与程永舟等^[13]在波浪正向入射斜坡时的实验结果不同,其试验结果表明,与无管相比,管线搁置于水深 $h_0=12.5$ cm处时,波高增大大约10%。而波浪自深海正向传向平直岸滩时,在有限水深范围内,波高随水深的减小略有减小^[18]。根据波浪理论:

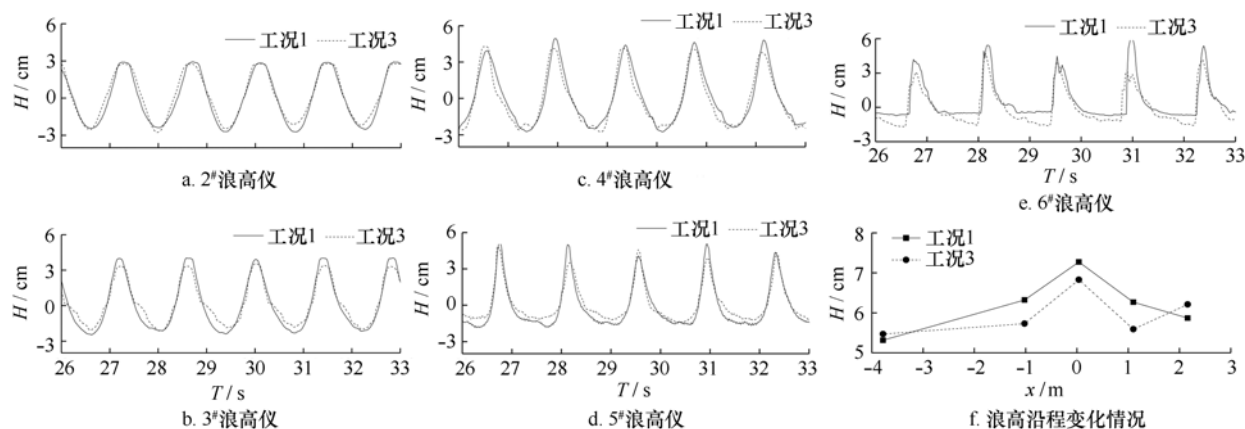


图5 管线对波浪传播的影响

Fig. 5 Effect of pipeline on wave propagation

$$H_i \propto H_0 \sqrt{\frac{c_0}{(cn)_i}}, \quad (1)$$

式中, c 为波速; n 为波能传递率; H 为波高;下标0和*i*分别为深水和任意水深处。波浪正向入射时,波浪能量的传播只在波浪传播方向有分量,波浪斜向入射时,部分能量沿岸线方向传播。当管线与波浪传播方向正交存在时,管线所处水深为有限水深,管线使波能沿波浪传播方向的传播率增加,沿岸线方向传播率减小,由式(1)知, n 增加, H_i 减小,即波高减小。

3.2 海底管线三维冲刷的宽度不平衡性

图6给出了冲刷坑示意图,冲刷宽度为管前沙垄顶点到管后淤积泥沙顶点的水平距离;对管线下方初始地形与冲刷平衡后地形的高程求差,用其最大值作为冲刷深度的值。根据实验结果,管线沿轴线方向的冲刷宽度和冲刷深度的值出现大小不一的情况,这种管线沿程冲刷深度和冲刷宽度的差异性就是管线局部冲刷的不平衡性。由于地形为左侧(y 的正方向)高右侧(y 的负方向)低,管线方向与波浪传播方向正交,管线所在的水深为左低右高,必将导致管线周围的不平衡性冲刷,其不平衡性主要体现在两个方面,一方面为冲刷坑宽度的不平衡性,即沿波浪传播方向左侧冲刷坑的尺度大于右侧;另一方面为冲刷坑深度的不平衡性,即左侧冲刷坑的垂向尺度大于右侧。

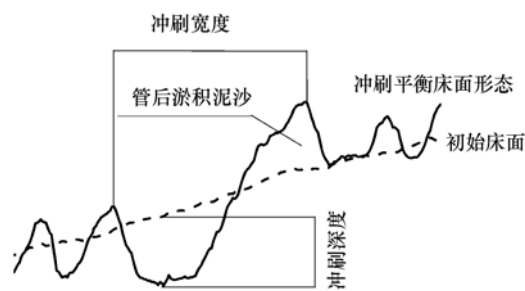


图6 冲刷坑示意图

Fig. 6 The schematic diagram of scour hole

图7给出了工况2、工况3、工况4、工况5下90 min后的地形演变结果,其周期不变,波高分别为4.39 cm、5.58 cm、7.17 cm、9.06 cm。由图可以看出,工况2沙纹发展不完全,冲刷坑形状规则,左右侧冲刷坑宽度差别不大,冲刷宽度不平衡性较弱;工况3管后沙纹发展较为完全,左侧管后淤积高度、淤积宽度显著增加,右侧增加的不明显,冲刷坑的宽度不平衡性程度很大;工况4沙纹进一步发展,管线前后形成平行于管线的沙纹,管后淤积较工况3少,管前冲刷加剧,冲刷坑的宽度不平衡程度比较明显;工况5沙纹尺度很大,左侧形成部分连通冲刷坑的沙纹,使管后淤积泥沙进一步减少,以至于左侧管后没有明显

的淤积,管线所在沙床整体冲刷较为严重,冲刷坑的

宽度不均衡性相对达到最大。

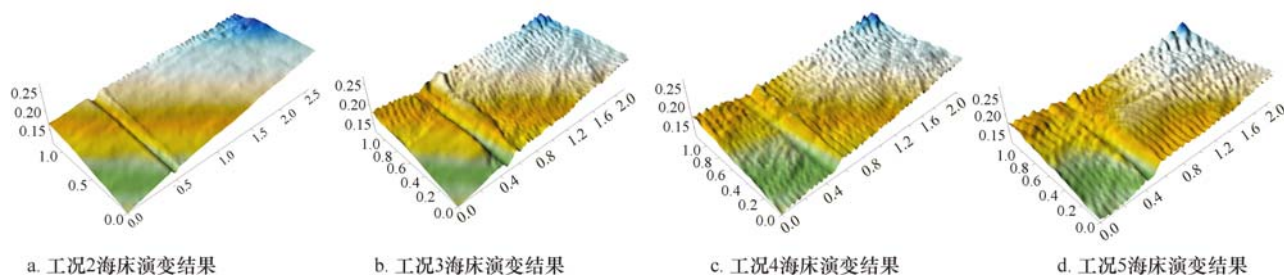


图7 波高对岸滩演变的影响(单位:m)

Fig. 7 Effect of wave height on beach evolution(Unit:m)

图8给出了工况6、工况7、工况4、工况8的90 min后的海床演变结果,其波高不变,周期分别为1.0 s、1.2 s、1.4 s、1.6 s。由图可以看出,工况6冲刷坑形状规则,沙纹尺度很小,冲刷坑宽度不均衡性很弱;与工况6相比,工况7沙纹尺度较有所发展,管前冲刷加剧,管后淤积泥沙增加,且左侧淤积高度明显大于右侧,左侧淤积泥沙到管线距离明显大于右侧,冲刷坑宽度不均衡性有所体现;相比于工况7,工况4沙纹进一步发展,管后淤积由右侧至左侧均匀后移,冲刷坑宽度的不均衡性进一步增加;工况8沙纹充分发展,沙纹尺度显著增加,管后淤积泥沙进一步后移,且有消失的趋势,冲刷坑宽度不均衡性程度很大。

由图7、图8的整体地形可以看出冲刷坑宽度的不均衡性主要受管后淤积泥沙位置的影响,所以取管线轴线到管后淤积泥沙的顶点水平距离的2倍代替冲刷宽度,沿管线轴线方向每隔3 cm取一点,分析水深变化对冲刷宽度的影响。图9给出了不同波高、不同周期时,冲刷宽度随水深的变化曲线。图中 x 为管

线轴线到管后淤积泥沙顶点的水平距离, $2x/D$ (D 为管径)为无量纲冲刷宽度, d/L (d 为水深, L 为波长)为水深参数, d/H (H 为波高)为相对水深。为了对不均衡性的程度进行定量的分析,定义冲刷宽度不均衡性系数 $\eta = x_{\text{左}}/x_{\text{右}}$ ($x_{\text{左}}$ 为左侧5个点的均值, $x_{\text{右}}$ 为右侧5个点的均值,左侧到右侧距离为1.2 m)。从图9a不难发现,周期为1.4 s时,左侧冲刷宽度为右侧的2倍左右,经计算不均衡性系数 η 约为1.8。说明增加波高时,普遍增加其左右侧冲刷宽度,但是左右侧冲刷宽度的不均衡性变化不大。图9b表明不同周期时,左右侧冲刷宽度的差值差异相对较大。经计算,周期为1.0 s、1.2 s、1.4 s、1.6 s时,不均衡性系数 η 分别为1.28、1.53、1.61、2.47,说明周期增大时,冲刷宽度的不均衡性依次增大。相对于图9a,周期增大时,整体冲刷宽度变化不大。上述分析表明,波高的增加对管后淤积泥沙的整体后移起了主要作用,而周期的变化对冲刷坑的宽度不均衡性的影响相对较大。

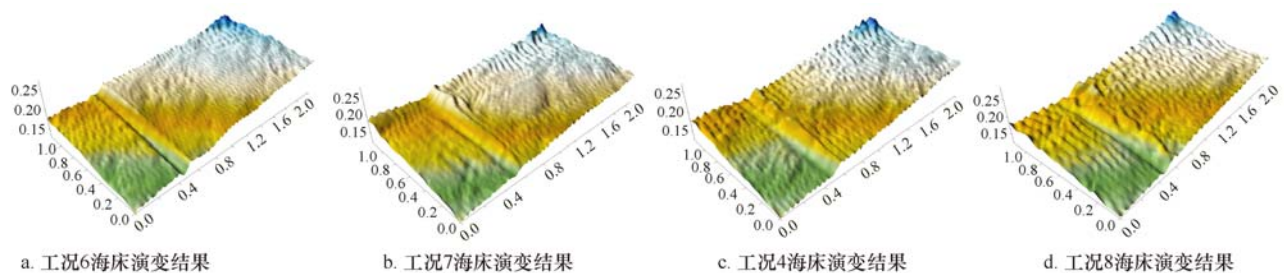


图8 周期对岸滩演变的影响(单位:m)

Fig. 8 Effect of wave period on beach evolution(Unit:m)

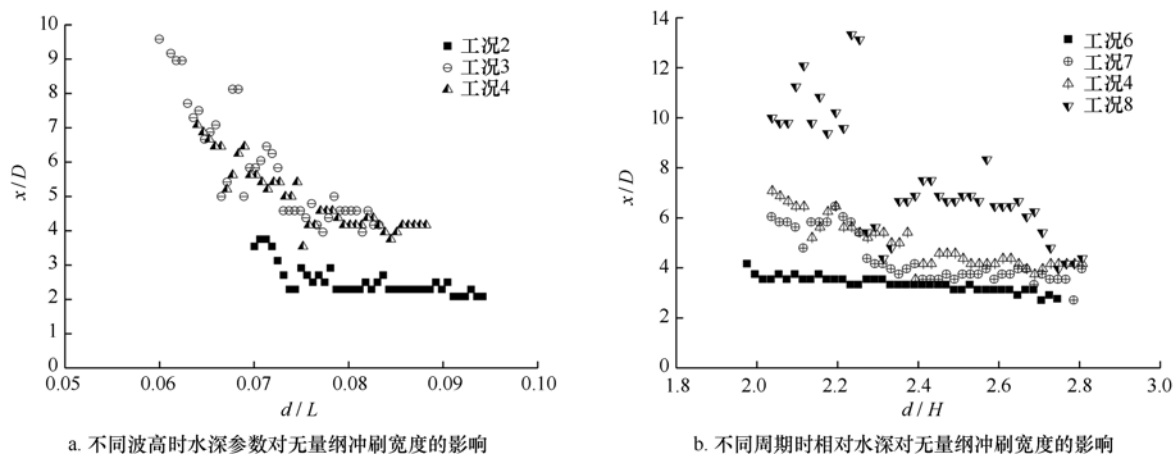


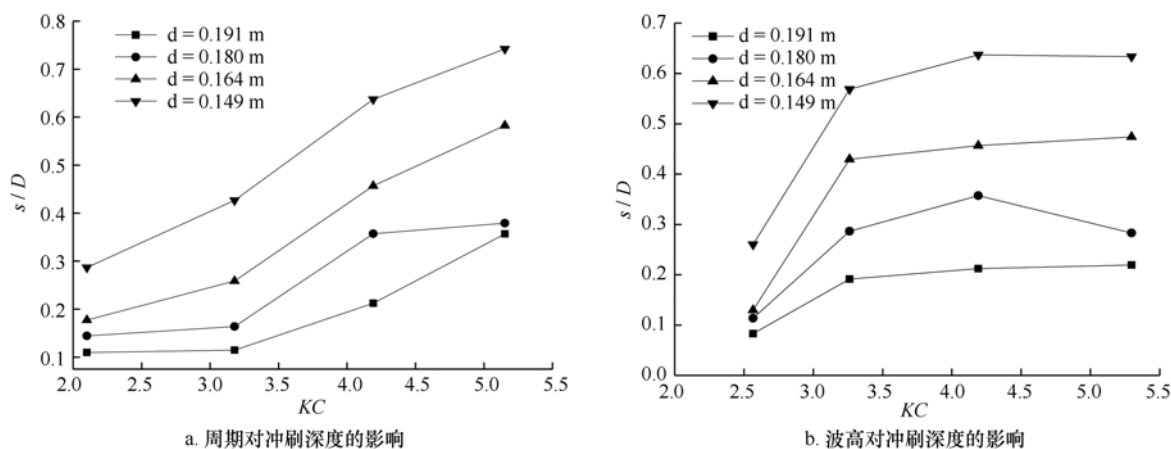
图9 水深对冲刷宽度的影响

Fig. 9 Effect of water depth on the scour width

3.3 海底管线局部冲刷的深度不平衡性

图10反映了不同水深时 KC 数对无量纲冲刷深度的影响。无量纲参数 KC 数表示为 $KC = U_m T / D$, 其中, U_m 为无管时相应位置(有管时管线与斜坡的切点相对应的位置)近底水质点速度的峰值。图10a中冲刷深度随周期增加而增大,且随 KC 数增加,周期对冲刷深度的影响比波高对其的影响更大。从图

10b可以看出,冲刷深度随波高的增加而增加,但冲刷深度并不是没有限制的,在同一水深情况下存在一个平衡值,随波高的增加,冲刷深度无限接近这个平衡的值。秦崇仁和彭亚^[19]根据实验数据及理论推导,得出的管线冲刷深度半理论半经验公式也证明了这个平衡的存在。

图10 不同水深时 KC 数对无量纲冲刷深度的影响Fig. 10 The influence of KC number on the scour depth parameter in different water depth

由图7、图8很难定量的反映出冲刷深度不平衡性的差异。对管线下方初始地形与冲刷平衡后地形高程求差,用其最大值作为斜坡上管线下方冲刷深度的值,沿管线轴线方向每隔3 cm取一点,分析水深变化对冲刷深度的影响。水深参数 d/L 和相对水深 d/H 与无量纲冲刷深度 s/D 的关系如图11所示。由

图不难发现,随水深的增加冲刷深度也相应减小,并且在一定范围内,其关系为一阶线性关系。

从图11a看出周期不变时,随水深增加,存在一个转折点,使冲刷深度减小的速率发生明显的改变。以此转折点为临界点,冲刷深度随水深的变化分为两个阶段:海底管线由深海向近岸延展时,冲刷深度随

水深减小而缓慢增加,此为缓慢发展阶段;当管线到达某一点时,其冲刷深度随水深减小而急剧增加,此为快速发展阶段。这个转折点不仅与波要素和水深有关,还与泥沙粒径、Froude 数、Shields 参数、 Re 数等

有关。图 11b 给出了不同周期时,相对水深对无量纲冲刷深度的影响。可以发现,周期不同,冲刷深度对水深的敏感程度也不同,即周期对冲刷深度的不均衡性影响较大。

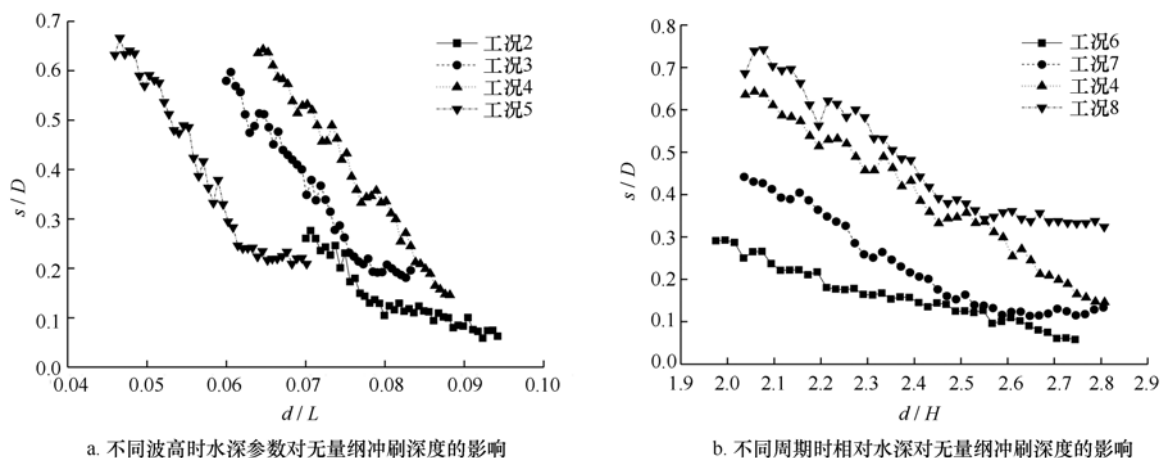


图 11 水深对冲刷深度的影响

Fig. 11 Effect of water depth on scour depth

为了对不均衡性的程度进行定量的分析,定义冲刷深度不均衡性系数 $\eta = s_{\text{左}} / s_{\text{右}}$ ($s_{\text{左}}$ 为左侧 5 个点的均值, $s_{\text{右}}$ 为右侧 5 个点的均值,左侧到右侧距离为 1.2 m)。从图 11 可以发现,周期为 1.4 s 时,左侧冲刷坑深度参数为右侧的约 3 倍,经计算不均衡性系数 η 约为 3.4,即随波高增加,冲刷深度不均衡性变化不大。波高为 7.17 cm 时,左侧冲刷深度参数为右侧的 2~3 倍减小。经计算,周期为 1.0 s、1.2 s、1.4 s、1.6 s 时,不均衡性系数 η 分别为 4.13、3.40、3.21、2.15,说明随周期增大,冲刷坑深度不均衡性程度减小。

4 结语

本文通过波浪港池实验,研究了波浪 45° 入射斜坡时,斜坡沙质海床上海底管线三维冲刷的宽度不均衡性和深度的不均衡性。斜坡上管线所在水深不同是引起三维冲刷不均衡性的根本原因,独特的波浪传播变形情况也在一定程度上影响了三维冲刷,得到的主要结论如下:

参考文献:

- [1] Mao Y. The interaction between a pipeline and an erodible bed[D]. Copenhagen: Technical University of Denmark, 1987.
- [2] Chiew Y M. Mechanics of local scour around submarine pipelines[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116(4): 515—529.
- [3] 臧志鹏, 滕斌, 程亮, 等. 水流作用下海底管线三维冲刷扩展速度试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(1): 110—114.

Zang Zhipeng, Teng Bin, Cheng Liang, et al. Experimental research on propagation velocity of 3-D scour of pipelines on sea floor under action of

(1) 波浪斜向传至海岸时,在相同水深位置上,左侧波高略大于右侧波高;管线与波浪传播方向正交存在时,沿程波高有所降低。

(2) 冲刷宽度不均衡性主要是由管后淤积泥沙的后移引起的,冲刷宽度不均衡性随周期增加而增大,波高对冲刷宽度不均衡性的影响不大;管线前后的整体冲刷宽度随波高的增加而增大,周期对整体冲刷宽度的影响规律不明显。

(3) 冲刷深度不均衡性随周期的增加而减小,冲刷深度随周期的增加而增大;波高对冲刷深度不均衡性影响很小,冲刷深度随波高的增加而增大,且存在一个平衡值,随波高增加冲刷深度接近这个平衡值。

(4) 海底管线冲刷深度随水深的减小分为两个阶段:第一个阶段为管线自深海到近岸,水深逐渐减小,冲刷深度缓慢增加,此为缓慢发展阶段;当管线到达某一水深时,其冲刷深度随水深减小而急剧增加,此为快速发展阶段。

- currents[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, 49(1): 110—114.
- [4] Wu Yushi, Chiew Y M. Three-dimensional scour at submarine pipelines[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 138(9): 788—795.
- [5] Wu Yushi, Chiew Y M. Mechanics of Three-Dimensional Pipeline Scour in Unidirectional Steady Current[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering & Practice, 2013, 4(1): 3—10.
- [6] 浦群, 李坤. 管线振荡绕流对砂床的冲蚀[J]. 力学学报, 1999, 31(6): 676—681.
Pu Qun, Li Kun. Scour of the sand bed below the pipeline in oscillating flow[J]. Acta Mechanica Sinica, 1999, 31(6): 676—681.
- [7] Sumer B M, Fredsøe J. Scour below pipelines in waves[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1990, 116(3): 307—323.
- [8] Sumer B M, Fredsøe J. Onset of scour below a pipeline exposed to waves[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 1991, 1(3): 189—194.
- [9] 潘冬子, 王立忠, 潘存鸿, 等. 推进波作用下海底管线周围局部冲刷试验研究[J]. 海洋工程, 2007, 25(4): 27—32.
Pan Dongzi, Wang Lizhong, Pan Cunhong, et al. Local scour around pipeline due to progressive wave[J]. The Ocean Engineering, 2007, 25(4): 27—32.
- [10] 夏令. 波浪作用下的泥沙起动及海底管线周围局部冲刷[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
Xia Ling. Sediment threshold and local scour around submarine pipelines under wave action[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [11] Esin C E, Yalc Y K. Scour under submarine pipelines in waves in shoaling conditions[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1999, 125(1): 9—19.
- [12] Myrhaug D, Muk Chen Ong, Cecilie Gjengedal. Scour below marine pipelines in shoaling conditions for random waves[J]. Coastal Engineering, 2008, 55(12): 1219—1223.
- [13] 程永舟, 杨桥梁, 黄筱云, 等. 斜坡海床上管道位置对其周围冲刷影响试验[J]. 长沙理工大学学报, 2015, 12(1): 55—62.
Cheng Yongzhou, Yang Qiaoliang, Huang Xiaoyun, et al. Experimental study on scour around submarine pipelines which placed at different positions of a sloped seabed[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology, 2015, 12(1): 55—62.
- [14] Cheng L, Yeow K, Zang Z P, et al. 3D scour below pipelines under wave and combined wave and currents[J]. Coastal Engineering, 2014, 83: 137—149.
- [15] 刘盈溢, 吕林, 郑苗子, 等. 波流作用下海床稳定性和海底管道局部冲刷分析[J]. 浙江大学学报, 2012, 46(6): 1135—1142.
Liu Yingyi, Lv Lin, Zheng Miaozi, et al. Analysis of seabed stability and local scour around submarine pipelines under waves and current[J]. Journal of Zhejiang University, 2012, 46(6): 1135—1142.
- [16] 郭荣, 童思陈, 张曼, 等. 基于声学多普勒流速仪的地形测量试验[J]. 水利水电科技进展, 2010, 32(增刊 2): 52—54.
Guo Rong, Tong Sichen, Zhang Man, et al. Topography measurement test based on the acoustic doppler velocimeter[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 32(S2): 52—54.
- [17] 陈子桑, 李志龙, 冯砚青, 等. 近岸带波高与周期分布的核密度估计[J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(2): 97—103.
Chen Zishen, Li Zhilong, Feng Yanqing, et al. Kernel density estimates on distribution of wave height and period in nearshore zone[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2007, 38(2): 97—103.
- [18] 邹志利. 海岸动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
Zou Zhili. Coastal Dynamics[M]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [19] 秦崇仁, 彭亚. 波浪作用下海底裸置管道周围的冲刷[J]. 港工技术, 1995(3): 7—12.
Qin Chongren, Peng Ya. Washing around the seabed pipeline placed barely by wave action[J]. Port Engineering Technology, 1995(3): 7—12.

The malconformation research of 3D scour below submarine pipelines under the oblique waves

Cheng Yongzhou^{1,2}, Lu Xianhe¹, Li Xiaochao^{1,2}, Yi Lei¹, Hu Youchuan¹

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410004, China)

Abstract: Due to the seabed undulating, the slope changed the action properties of wave on pipeline and seabed necessarily and then will affect three-dimensional scouring below pipelines. For the experimental research of the three-dimensional scouring characteristics of submarine pipeline, a median particle size of 0.22 mm and the 45° angle of the slope are used by considering the effect of the oblique wave, which is based on the experimental results of the

wave basins. The malconformation of pipelines three-dimensional scour is analyzed by measuring the width and depth of the scour hole in the pipeline. The experimental results show that the existence of pipeline makes the wave height on the slope to reduce; under the action of slope, the malconformation of the three-dimensional scouring characteristics of submarine pipelines is assumed by the malconformation of the depth and width, and the malconformation of the width is responsible for the sediment behind the pipeline is moved backwards. The influence of the malconformation of three-dimensional scour of the cycle is higher than the wave height. With the decrease of the water depth, scour depth is divided into slow development stage and rapid development phase when the pipelines extend from the deep sea to the seacoast.

Key words: submarine pipeline; scour; slope seabed; oblique wave