

考虑渗流力的海床临界冲刷机理及计算方法

王 虎^{1,2}, 刘红军^{1,2}, 王秀海^{1,2}

(1. 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要:从波浪引起的海床内部渗流与床面泥沙运动耦合的角度出发,研究波浪作用下海床临界冲刷机理及计算方法。研究表明,波浪作用下床面泥沙起动及冲刷是一个不断向下发展的过程,最终达到一个临界冲刷深度。波浪引起的渗流力能够显著降低泥沙的临界起动切应力,促进泥沙起动,是影响海床冲刷的一个重要因素。将渗流力引入到传统泥沙起动公式中,推导并给出了波浪作用下海床临界冲刷深度的计算方法。结合室内和现场两个算例,很好地解释了波浪水槽试验中海床“流化”现象和黄河水下三角洲粉砂流冲沟等灾害地貌特征及成因,初步验证了该方法用于评价和计算海床冲刷的有效性。

关键词:波浪;海床;冲刷;渗流力;泥沙临界起动

中图分类号: TV148

文献标志码: A

文章编号: 1001-6791(2014)01-0115-07

波浪导致的海床冲刷,能够引起岸滩侵蚀和航道淤积,诱发各种海底地质灾害,威胁海洋工程结构物的安全稳定^[1]。泥沙的临界起动是河口海岸动力学中的一个基本问题,也是判断海床冲刷的基础,海床的临界冲刷深度则是海洋工程设计和稳定性评价的要点。波浪作用下泥沙的临界起动已有较为系统的研究^[2-3]。泥沙的临界起动条件有3种表达方法:力、流速和功率。但与泥沙起动直接相关的是切应力,泥沙起动的本质是一个静力学平衡问题,单个泥沙颗粒会受到重力、水流拖曳力和上举力作用。另外,钱宁和万兆惠^[2]指出,在河水位与两岸地下水位相差悬殊、河床渗流现象显著时,床面泥沙颗粒还要承受渗流力的作用。刘亮等^[4]探讨了点源渗流条件下泥沙起动特征,谢立全和于玉贞^[5-6]研究了渗流条件下江河岸坡的泥沙起动规律和变形特征,程永舟等^[7]指出了长周期波浪作用下渗流力对细颗粒泥沙起动的重要影响。

研究表明,波浪能够引起海床内明显的孔隙水压力累积,海床内部形成渗流通道,细粒物质脱离土骨架并随着孔隙水渗流到床面,同时伴随着显著的床面泥沙起动和再悬浮^[8-12],床面附近一定厚度的沉积物发生“流化”^[8],形成一种高密度振荡流^[9-10]。值得注意的是,海床“流化”与泥沙起动和再悬浮是同时发生的^[11],悬沙浓度、床面切应力与海床内部孔隙水压力累积有良好的对应关系,三者的峰值几乎同时出现^[12]。综上可知,波浪导致的渗流等海床内部响应与泥沙颗粒起动及冲刷等床面泥沙运动特征密切相关,泥沙起动和冲刷属传统泥沙动力学范畴,渗流则是土力学的重要研究内容,鲜见考虑二者耦合的冲刷计算模型。本文基于土力学与泥沙动力学相结合的思路,分析波浪作用下海床冲刷的物理机制,考虑渗流力和床面高密度振荡流的影响,推导并给出了波浪作用下海床临界冲刷深度的计算方法。结合室内和现场两个典型算例,考察并初步验证了本文算法在海床冲刷评价中的合理性和有效性。

收稿日期: 2013-04-15; 网络出版时间: 2013-11-30

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20131130.1543.007.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41072216); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100132110001)

作者简介: 王虎(1986—),男,天津宝坻人,博士研究生,主要从事海洋环境岩土方面的研究。

E-mail: wanghu824@126.com

通信作者: 刘红军, E-mail: hongjun@ouc.edu.cn

1 理论推导

1.1 物理模型

在海洋中,波浪引起的附加应力能够改变海床内部应力场,不同深度海床土之间因不同的孔隙水压力累积幅值而产生压力梯度,进而诱发渗流。海床表面是自由排水边界,因此压力梯度减小的方向也就是渗流力的方向总是从海床内部指向床面。渗流力能够显著降低床面泥沙颗粒的临界起动流速^[4,7],促进泥沙颗粒的起动,渗流力是海洋泥沙起动研究中一个必须要考虑的因素。波浪作用下海床冲刷的物理机制如图 1 所示。在图 1(a)海床表面任意选取一泥沙颗粒 A,其受力情况如图 1(b)所示,在传统重力、拖曳力和上举力的基础上添加了一项渗流力,此力为垂直床面向上的渗流力或斜向渗流力的垂向分量。建立力学平衡方程,可得泥沙颗粒的临界起动切应力。同时波浪产生一个床面切应力,一旦床面切应力超过泥沙临界起动切应力,则泥沙起动,冲刷发生。

随着波浪的持续作用,初始床面泥沙颗粒起动,已经起动的泥沙颗粒或推移、跃移或悬浮,脱离床面进入水体或呈现为流态,可认为水深 h 不断加深,床面泥沙起动不断向下发展。被起动的泥沙如果未发生净输运,则堆积在床面附近形成一定厚度的高密度振荡流^[9-10],即图 1(a)中所示的流化土层,其密度远大于海水而接近饱和土体密度。随着冲刷不断向下发展,流化土层的厚度 Δh 不断增大,而随着水深增加,床面切应力不断减小,直至床面切应力与泥沙的临界起动切应力达到平衡,则冲刷停止。最终的流化土层厚度,即初始海床面与最终冲刷面之间的厚度 Δh ,为临界冲刷深度。

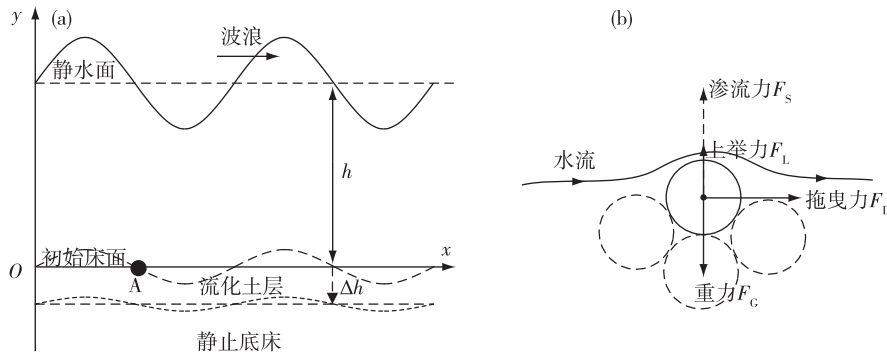


图 1 波浪作用下海床冲刷的物理模型

Fig. 1 Physical model of the wave-induced seabed scour

1.2 公式推导

对应于单个的泥沙颗粒,考虑水流对泥沙颗粒的拖曳力、上举力,泥沙颗粒所受重力和向上的渗流力,泥沙临界起动时力的瞬时平衡方程如下:

$$F_D = (F_G - F_L - F_s) \tan \varphi \quad (1)$$

式中 F_D 为水流拖曳力; F_G 为泥沙浮重; F_L 为上举力; F_s 为渗流力; φ 为饱和土静止内摩擦角。根据窦国仁等^[3]的研究:

$$F_D = C_D \frac{\pi d^2}{4} \frac{\tau_s}{2} \quad (2)$$

$$F_L = C_L \frac{\pi d^2}{4} \frac{\tau_s}{2} \quad (3)$$

$$F_G = (\rho_s - \rho) g \frac{\pi}{6} d^3 \quad (4)$$

式中 τ_s 为临界起动切应力; d 为泥沙粒径 (一般取为中值粒径 d_{50}); ρ_s 为泥沙颗粒密度; ρ 为水体密度; 阻力系数 $C_D=0.4$; 上举力系数 $C_L=0.1$ 。式 (1) 较传统公式添加了一项渗流力 F_s , 表达式为

$$F_s = \frac{\pi d^3}{6} \frac{\Delta P}{\Delta L} \quad (5)$$

式中 ΔL 为海床内部两点之间的深度差; ΔP 为两点之间的超孔隙水压力差。将式 (2) ~ 式 (5) 各力的表达式代入到式 (1), 可得临界起动切应力 τ_s 表达式为

$$\tau_s = \frac{\left[(\rho_s - \rho) g \frac{\pi d^3}{6} - \frac{\pi d^3}{6} \frac{\Delta P}{\Delta L} \right] \tan \varphi}{\frac{\pi d^2}{8} (C_D + C_L \tan \varphi)} \quad (6)$$

波浪引起的海床表面最大切应力 τ_m 的计算公式为

$$\tau_m = \frac{1}{2} f_w \rho_1 u_m^2 \quad (7)$$

式中 ρ_1 为床面附近流体密度; u_m 为海底最大轨迹质点速度; f_w 为琼森阻力系数, 取决于边界层中的流态, 具体决定于水流雷诺数 Re 和海床面相对粗糙度 a_m/r , 计算公式如下:

$$a_m = \frac{H}{2} \frac{1}{\text{sh}(2\pi h/L)} \quad (8)$$

$$Re = \frac{u_m a_m}{\nu} = \frac{\pi H^2}{2T^2} \frac{1}{[\text{sh}(2\pi h/L)]^2} \quad (9)$$

式中 H 为波高; h 为水深; a_m 为近底波浪质点位移的振幅; ν 为水体运动粘滞系数; 对于平坦面, r 为泥沙颗粒半径, 根据相对粗糙度 a_m/r 和雷诺数 Re , 查文献 [13] 可得 f_w , 进而可求得 τ_m 。

比较床面最大切应力 τ_m 和临界起动切应力 τ_s , 即可判定泥沙颗粒是否起动。不断加大水深 h , τ_m 不断减小, 直到 τ_s 首次超过 τ_m , 则冲刷不再发展, 得到临界冲刷深度 Δh 。床面附近流化层是一种高密度的粘性流体, 参照文献 [14], 近似取为饱和土的密度, 动力粘滞系数近似为纯水 $\nu=0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

2 算例分析

2.1 算例 1

Tzang 和 Ou^[8] 在水槽试验中发现了波浪作用下海床土渗流、悬浮、孔隙水压力累积升高以及“流化”的现象, 理论分析显示, 流化土层的超孔隙水压力并未达到土体的有效自重, 液化理论难以很好地解释试验现象。选取具有代表性的数据最全的试验 8-1 为例, 试验用土的基本参数: 中值粒径 $d_{50}=0.092 \text{ mm}$, 颗粒密度 $\rho_s=2.63 \text{ g/cm}^3$, 孔隙度 $n=0.47$, 土体密度 $\rho_1=1.885 \text{ g/cm}^3$, 根据文献 [8] 所述, 砂土处于非常疏松的状态, 并且泊松比只有 0.49, 饱和内摩擦角取 $\varphi=20^\circ$ 。波浪参数: 波高 $H=0.111 \text{ m}$, 周期 $T=1.78 \text{ s}$, 波长 $L=3.36 \text{ m}$, 水深 $h=0.45 \text{ m}$ 。试验得到的典型孔隙水压力变化曲线 (床面以下 30 cm) 见图 2^[8]。从图 2 可以看到孔隙水压力累积升高, 最终达到并维持在一稳定值, 不同深度的最大超孔隙水压力 (孔隙水压力曲线上最高点所对应的压力值): -45 cm 处为 3.73 kPa, -30 cm 处为 2.37 kPa, -15 cm 处为 1.32 kPa, -10 cm 处为 0.86 kPa, -5 cm 处为 0.52 kPa。 ΔP 基本维持不变, 因而假设相邻两点之间的渗流压力梯度为 $\Delta P/\Delta L$ 不变, 采用 1.2 节所述方法进行计算, 切应力随深度变化情况绘制于图 3, 相关的计算数据和计算结果列于表 1。

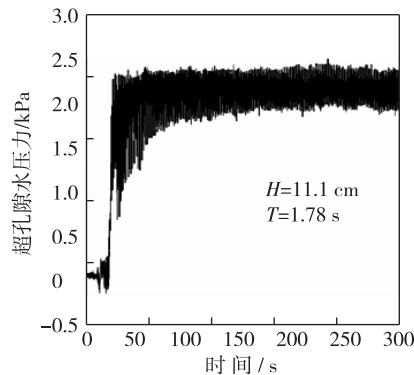
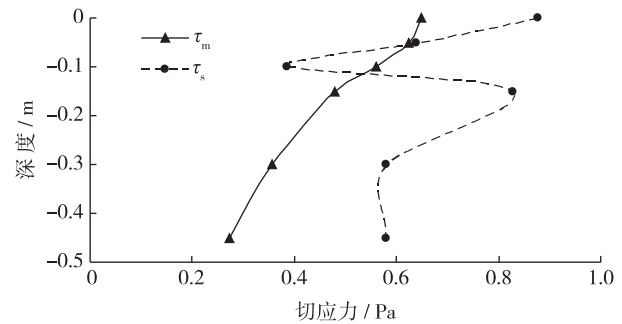
图 2 Tzang^[8] 试验中典型孔隙水压力曲线Fig. 2 Typical pore water pressure curve in Tzang's test^[8]

图 3 算例 1 切应力随深度变化特征

Fig. 3 Variation of shear stresses along depth for example 1

从表 1 可以看出, 床面最大切应力 τ_m 随水深增加而逐渐减小。泥沙临界起动切应力 τ_s 随渗流压力梯度 $\Delta P/\Delta L$ 的增大而减小, 表明渗流力能够显著减小泥沙临界起动切应力。从图 3 可以看出, τ_s 在 -10 cm 附近达到最小值并且远小于 τ_m , 泥沙最容易起动; τ_s 在 -5 cm 处近似等于 τ_m ; τ_s 在床面处大于 τ_m , 泥沙不会起动。由于表层的封闭作用, 海床应该不会发生冲刷, 但实际上却发生了“流化”现象。计算中采用的是泥沙中值粒径 d_{50} , 而实际的海床土是有一定级配的, 既有大于中值粒径的较大颗粒, 也有小于中值粒径的较小颗粒。表层 5 cm 范围内, 较大颗粒无法起动, 但小于中值粒径的较小颗粒则足以被起动, 并随着渗流向上输运并进入水体, 这也与试验中观察到的细颗粒脱离骨架向上输运和悬浮的现象一致。细颗粒起动及向上渗流输运促使大颗粒松动、下沉, 由于 -10 cm 处 τ_s 远小于 τ_m , 下沉到 -10 cm 附近的大颗粒也已满足起动条件, 床面以下一定深度范围内 (约 15 cm) 发生冲刷。由于水槽边界的限制作用和水体含沙能力的有限性, 一部分已起动的泥沙无处输运, 继续堆积在床面附近, 形成一定深度的高密度流化振荡层, 即“流化”。

表 1 算例 1 计算数据

Table 1 Parameters of example 1

深度/m	渗流压力梯度 ($\Delta P \cdot \Delta L^{-1}$)/(kPa $\cdot$ m $^{-1}$)	雷诺数 $Re/10^3$	相对粗糙度 a_m/r	琼森阻力系数 f_w	床面最大切应力 τ_m/Pa	临界起动切应力 τ_s/Pa
0	7.40	12.19	639	0.016	0.649	0.877
-0.05	9.74	9.37	560	0.020	0.623	0.638
-0.10	12.20	7.31	495	0.023	0.559	0.386
-0.15	7.88	5.78	440	0.025	0.480	0.828
-0.30	10.32	2.98	316	0.036	0.357	0.579
-0.45	10.32	1.61	232	0.051	0.273	0.579

2.2 算例 2

海洋地质调查和勘察发现, 黄河水下三角洲广泛发育有海底滑坡、塌陷凹坑、滑塌陡坎、粉砂流冲沟和扰动地层等海底灾害地貌, 其中塌陷凹坑深度为 0.5~2.0 m、滑塌陡坎最大深度 2.0 m、扰动地层厚度为 2.5~4.5 m、粉砂流冲沟深度为 2.4~5.9 m^[15-18]。由于缺乏原位孔隙水压力监测数据, 本文采用数值计算得到的波浪作用下海床孔隙水压力数据, 该计算基于饱和土动力固结理论, 采用推算得到的 1 年一遇最大波浪条件和现场实测的土性条件, 并与现场调查结果进行了验证, 详细的计算方法见文献[19]。波浪条件为: 波高 $H=2$ m, 波长 $L=40$ m, 周期 $T=4$ s, 水深 $h=10$ m。土体参数: 土体密度 $\rho_1=1.82$ g/cm 3 , 土颗粒密度 $\rho_s=2.69$ g/cm 3 , 孔隙比 $e=0.487$, 水下内摩擦角 $\varphi=27^\circ$, 中值粒径 $d_{50}=0.041$ mm。切应力随深度变化见图 4, 相关的计算数据和计算结果见表 2。

从图 4 和表 2 可以看出, 1 年一遇最大波浪条件下, 海床存在冲刷的可能性, 临界冲刷深度在 3 m 左右。

结合本文理论和计算结果对黄河水下三角洲的灾害地貌成因机制进行分析: 若波浪条件保持不变, 且没有潮流等造成的净输运, 则床面附近泥沙将形成高密度振荡流, 其往复振荡特征类似于现场观测到的海底滑坡及复活^[17]; 若波浪条件不变, 同时受到潮流作用, 泥沙以推移质形式被输运走, 则可能形成粉砂流和冲沟地貌; 若波浪条件减小, 细颗粒物进入到水体当中, 流化土层被粗化并沉积再固结, 则形成具有更好工程性质的扰动地层^[18], 俗称“铁板砂”。上面分析的 3 种情况分别对应着不同的灾害地貌类型, 同时计算所得的临界冲刷深度 3 m 与上述的塌陷凹坑、滑塌陡坎、粉砂流冲沟和扰动地层等各种海底灾害地貌的深度有较好的一致性, 显示了计算和分析的合理性。

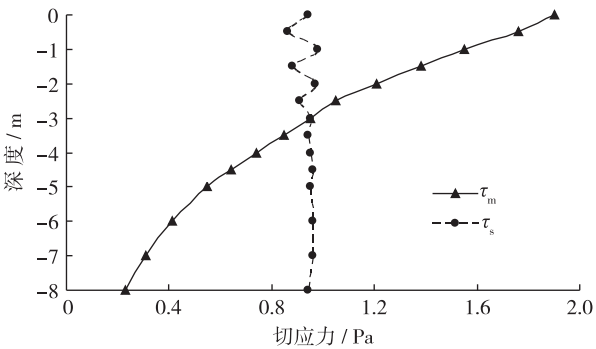


图 4 算例 2 切应力随深度变化特征
Fig. 4 Variation of shear stress along depth for example 2

表 2 算例 2 计算数据
Table 2 Parameters of example 2

深度/m	渗流压力梯度 ($\Delta P \cdot \Delta L^{-1}$)/(kPa·m ⁻¹)	雷诺数 $Re/10^5$	相对粗糙度 ($a_m \cdot r^{-1}$)/10 ³	琼森阻力系数 $f_w/10^{-2}$	床面最大切应力 τ_m/Pa	临界起动切应力 τ_s/Pa
0	1.30	2.370	10.60	0.70	1.90	0.94
-0.5	2.66	2.000	9.73	0.77	1.76	0.86
-1.0	0.68	1.690	8.95	0.80	1.55	0.98
-1.5	2.36	1.430	8.23	0.84	1.38	0.88
-2.0	0.88	1.210	7.58	0.87	1.21	0.97
-2.5	1.76	1.030	6.98	0.89	1.05	0.91
-3.0	1.16	0.876	6.44	0.95	0.95	0.95
-3.5	1.40	0.745	5.94	1.00	0.85	0.94
-4.0	1.20	0.634	5.48	1.02	0.74	0.95
-4.5	1.00	0.540	5.05	1.04	0.64	0.96
-5.0	1.20	0.460	4.67	1.05	0.55	0.95
-6.0	1.10	0.334	3.98	1.08	0.41	0.96
-7.0	1.10	0.243	3.39	1.10	0.31	0.96
-8.0	1.33	0.177	2.90	1.13	0.23	0.94

3 结 论

- (1) 波浪引起的海床内部渗流与床面泥沙运动密切相关, 渗流力能够显著降低泥沙临界起动切应力, 是影响海床冲刷的一个重要因素。波浪的持续作用下, 床面泥沙起动及冲刷是一个不断向下发展的过程, 并将最终达到一个临界深度。
- (2) 在传统泥沙起动公式的基础上, 考虑渗流力和床面高密度流的影响, 推导并给出了波浪作用下海床临界冲刷深度的计算方法。结合两个算例, 很好地解释了水槽试验中的“流化”现象和黄河水下三角洲粉砂流冲沟等海底灾害地貌的特征及成因, 表明了本文方法在海床冲刷评价和计算中的良好前景。

参考文献:

[1] SUMER B M, FREDSTØE J. The mechanics of scour in the marine environment[M]. Singapore: World Scientific, 2002.
[2] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. (CHIEN Ning, WAN Zhaohui. Mechanics of sediment transport [M]. Beijing: Sciences Press, 2003. (in Chinese))

- [3] 窦国仁, 窦希萍, 李禔来. 波浪作用下泥沙的起动规律[J]. 中国科学: E 辑, 2001, 31(6): 566-573. (DOU Guoren, DOU Xiping, LI Tilai. Law of sediment incipient motion under wave action[J]. Science in China: Ser E, 2001, 31(6): 566-573. (in Chinese))
- [4] 刘亮, 何建新, 侯杰, 等. 点源渗流作用下泥沙起动试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(2): 54-56. (LIU Liang, HE Jianxin, HOU Jie, et al. Experimental study on incipient velocity of sediment subject to point source seepage[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2011, 9(2): 54-56. (in Chinese))
- [5] 谢立全, 于玉贞. 渗流作用下的岸坡泥沙起动条件[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(9): 1534. (XIE Liquan, YU Yuzhen. Study on incipient motion condition of riverbank sand subject to seepage [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2006, 46(9): 1534. (in Chinese))
- [6] 于玉贞, 谢立全, 孙逊. 渗流作用下的江河岸坡冲刷变形分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(S1): 311-314. (YU Yuzhen, XIE Liquan, SUN Xun. Analysis of scour deformation of riverbank subject to seepage force[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S1): 311-314. (in Chinese))
- [7] 程永舟, 蒋昌波, 潘昀, 等. 波浪渗流对泥沙起动的影响[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 258-263. (CHENG Yongzhou, JIANG Changbo, PAN Yun, et al. Effect of wave induced seepage force on incipient sediment motion[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 258-263. (in Chinese))
- [8] TZANG S Y, OU S H. Laboratory flume studies on monochromatic wave-fine sandy bed interactions: Part 1: Soil fluidization[J]. Coastal Engineering, 2006, 53(11): 965-982.
- [9] 刘红军, 刘莹, 张民生, 等. 波浪作用下黄河口粉土液化与振荡层形成试验研究[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(5): 1013-1018. (LIU Hongjun, LIU Ying, ZHANG Minsheng, et al. Study on liquefaction of silty soil and the development of surging layer under wave actions at Yellow River estuary[J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(5): 1013-1018. (in Chinese))
- [10] 张民生, 刘红军, 李晓东, 等. 波浪作用下黄河口粉土液化与“铁板砂”形成机制的模拟试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3347-3356. (ZHANG Minsheng, LIU Hongjun, LI Xiaodong, et al. Study of liquefaction of silty soil and mechanism of development of hard layer under wave actions at Yellow River Estuary[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3347-3356. (in Chinese))
- [11] TZANG S Y, OU S H, HSU T W. Laboratory flume studies on monochromatic wave-fine sandy bed interactions: Part 2: Sediment suspensions[J]. Coastal Engineering, 2009, 56(3): 230-243.
- [12] TZANG S Y, CHEN Y L, OU S H. Experimental investigations on developments of velocity field near above a sandy bed during regular wave-induced fluidized responses[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(7): 868-877.
- [13] JONSSON I G. Wave boundary layer and friction factors[C]//Proceedings 10th Coastal Engineering Conference, Coastal Engineering. New York: ASCE, 1966: 127-148.
- [14] SASSA S, SEKIGUCHI H, MIYAMOTO J. Analysis of progressive liquefaction as a moving-boundary problem[J]. Geotechnique, 2001, 51(10): 847-857.
- [15] 李海东, 杨作升, 王厚杰, 等. 现代黄河水下三角洲地质灾害现象的空间分布[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(4): 37-43. (LI Haidong, YANG Zuosheng, WANG Houjie, et al. Factors of geohazards in the modern Yellow River delta [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2006, 26(4): 37-43. (in Chinese))
- [16] 周良勇, 刘健, 刘锡清, 等. 现代黄河三角洲滨浅海区的灾害地质[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(3): 19-27. (ZHOU Liangyong, LIU Jian, LIU Xiqing, et al. Coastal and marine geohazards in the modern Yellow River delta[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2004, 24(3): 19-27. (in Chinese))
- [17] PRIOR D B, SUHAYDA J N, LU N Z, et al. Storm wave reactivation of a submarine landslide[J]. Nature, 1989, 341(6237): 47-50.
- [18] XU Guohui, SUN Yongfu, WANG Xin, et al. Wave-induced shallow slides and their features on the subaqueous Yellow River delta [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(12): 1406-1417.
- [19] 刘红军, 王虎, 张民生, 等. 波浪作用下黄河三角洲粉质土海床动力响应分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 2065-2071. (LIU Hongjun, WANG Hu, ZHANG Minsheng, et al. Analysis on wave-induced dynamic response of silty seabed in the Yellow River delta[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 2065-2071. (in Chinese))

Mechanism of seabed scour and its critical condition estimation by considering seepage forces*

WANG Hu^{1,2}, LIU Hongjun^{1,2}, WANG Xiuhai^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Qingdao 266100, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The phenomena in the vicinity of seabed surface such as sediment movement are closely related to the wave-induced seepage in the seabed. In this study, the mechanism of seabed scour is investigated, and the estimation of critical conditions for the scouring due to wave-induced seepage force is discussed in detail. Results show that the incipient motion of sediment and the scouring under wave actions are a process that goes progressively downward from seabed surface until reaching a critical scour depth eventually. The critical incipient shear stress of sediment can be reduced and the incipient motion of sediment can certainly be promoted due to the wave-induced seepage force. The wave-induced seepage force is considered as an important driving factor in the estimation of critical conditions for the scouring. The seepage force is supplemented to the traditional formula for estimating the incipient motion of sediment, and a new method for the estimation of critical scour depth due to wave-induced seepage can thus be derived. Two case studies are performed. The “fluidization” phenomenon in the laboratory flume and the genetic mechanism of the submarine geological hazards such as the gully of the silt flow in the Yellow River delta are well explained. The effectiveness of the new method for estimating and assessing seabed scouring has been preliminary tested.

Key words: wave; seabed; scour; seepage force; incipient motion of sediment

欢迎订阅《水科学进展》

《水科学进展》是以水为论述主题的学术期刊, 主要反映国内外在暴雨、洪水、干旱、水资源、水环境等领域中的科学技术的最新成果、重要进展、当代水平和发展趋势, 报道关于水圈研究的新事实、新概念、新理论和新方法, 交流新的科研成果、技术经验和科技动态。她涉及与水有关的所有学科, 包括水文科学、大气科学、海洋科学、地质科学、地理科学、环境科学、水利科学和水力学、冰川学、水生态学以及法学、经济学和管理科学中与水有关的内容。本刊为全国中文核心期刊、中国科技核心期刊、RSSCE 中国权威学术期刊, 多次被评为“中国精品科技期刊”、“华东地区优秀期刊”、“江苏省优秀期刊”等, 同时被 Ei 和 CA 等国际权威文献检索系统固定收录。

《水科学进展》为双月刊, 大 16 开本, 逢单月 30 日出版, 每期定价 30.00 元, 全年定价 180.00 元。国际标准连续出版物号: ISSN 1001-6791; 国内统一连续出版物号: CN 32-1309/P; 国内发行代号: 28-146, 欢迎广大读者向当地邮局(所)办理订阅手续。

《水科学进展》编辑部

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41072216) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (No. 20100132110001).