

潮流作用下海洋平台桩基冲刷过程 及冲刷深度计算^{*}

孙永福^{1,2}, 宋玉鹏², 孙惠凤², 马江³

(1. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266003; 2. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;
3. 青岛瑞源工程集团有限公司, 山东 青岛 266510)

摘 要: 对埕岛油田典型平台周边多年监测所得的水深资料进行了分析研究, 探讨了平台在潮流作用下的桩基冲刷过程及冲刷坑形态与分布, 并选取经验公式对平台桩基极限冲刷深度进行了计算, 计算结果与实测结果比较表明, 所选公式在埕岛海域具有较好的适用性。

关键词: 桩基冲刷; 漩涡; 冲刷深度; 潮流

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2007)02-0178-06

海洋工程中, 圆柱结构为基础的构筑物占据了很大比重, 其中以石油平台为代表。平台建成后, 桩柱会改变此区域原来的水流动力场, 在桩柱前方形成二次流并在其周围形成漩涡, 桩柱周围流速加快, 会对桩柱周边的海底产生一定程度的冲刷, 形成冲刷坑, 进而影响平台稳定性。桩基冲刷的问题最早在 20 世纪 60 年代末由 Palmer^[1] 提出, 他现场监测了波浪与水流联合作用下单桩周围海底的冲刷坑形成过程与冲刷速率, 得出了一些有益的结论。20 世纪 70 年代以后, 随着桩基冲刷问题越来越引起人们的关注, 对此领域的研究投入逐渐增多。国内外学者在桩基冲刷动力机制、冲刷过程、冲刷坑形态、冲刷深度计算以及不同底质类型对冲刷过程的影响等方面研究取得了一定的进展^[2-8]。

目前对于桩基冲刷的研究主要通过现场监测和模型试验来进行, 且以后者为主。现有的模型试验中, 很难能够依靠建立的比尺模型来精确描述波浪、潮流作用下的桩基实际冲刷过程和形成冲刷坑的几何尺寸, 因此, 还主要依靠试验数据取得的经验关系来推测桩基冲刷状况。现有的研究多集中在关注恒定流作用下桩柱周围形成漩涡的特性, 而对潮流作用下的桩基冲刷研究却不多。尽管通过比尺试验能够取得一定数量的试验数据, 从而对漩涡的产生原因及其特性有了更深刻的认识, 但是在海洋工程中还很难把这些认识直接应用到设计中。将试验数据运用到工程实际中去的一个主要限制是缺乏恰当的运动学与动力学方面的比尺准则^[8]。另外, 对于推导得到的桩基冲刷深度计算公式也缺乏足够可靠的现场实测数据加以验证。目前桩基冲刷研究主要针对的底质是较粗颗粒, 多以砂为主, 而对于底质为粉粘土的情况却所知甚少。

埕岛油田平台桩基目前也面临着冲刷的问题。本文通过对平台桩基冲刷过程的简要论述, 结合现场水深地形监测数据, 运用不同经验公式对埕岛油田典型平台桩基冲刷深度进行计算, 以期寻求在此区域具有较强适用性的经验公式。

* 收稿日期: 2006 03 15

作者简介: 孙永福(1964), 男, 山东潍坊人, 博士, 研究员, 主要从事海洋工程环境研究。

1 研究区概况

1.1 地理位置及地形地貌特征

埕岛油田地处渤海湾的南侧湾口, 与莱州湾和渤海中央区相连接, 海区位于现代黄河三角洲的前缘。地势西南高, 东北低, 是黄河 1953–1964 年神仙沟流路和 1964–1976 年刁口流路走河期间形成的 2 个亚三角洲。

埕岛油田的井组平台分布在水下岸坡和海底平原上, 平台的修建改变了附近海区原有的动力条件, 对海底产生了较强烈的冲蚀作用, 因受底质差异的影响, 形成了冲刷坑和冲刷坑外围的冲刷沟槽、纹状沙波、沙斑等海底微地貌类型。本文通过分析多次现场勘测所得到的 CB25C 及 CB12C 井组平台区水深地形资料以及地貌特征, 重点讨论 2 组平台的桩基冲刷过程, 并选择其他典型平台进行桩基冲刷深度计算。

CB25C 和 CB12C 井组平台位于埕岛油田中心部位, CB25C 平台 1997 年建成, 水深 12.6 m 左右, CB12C 平台 2001 年建成, 水深 9.6 m 左右。2 个井组平台均由井口平台、工艺平台和立管组成, 平台由 4 根圆柱形桩柱支撑, 每根桩柱直径 1.2 m。

1.2 研究区海洋动力特征

研究区海域的波浪主要是风成浪, 具有生成快、消失也快和波周期 10 s 以上的大浪很少出现等特点。典型平台所在位置及区域内 10 a 一遇有效波高分布如图 1 所示。

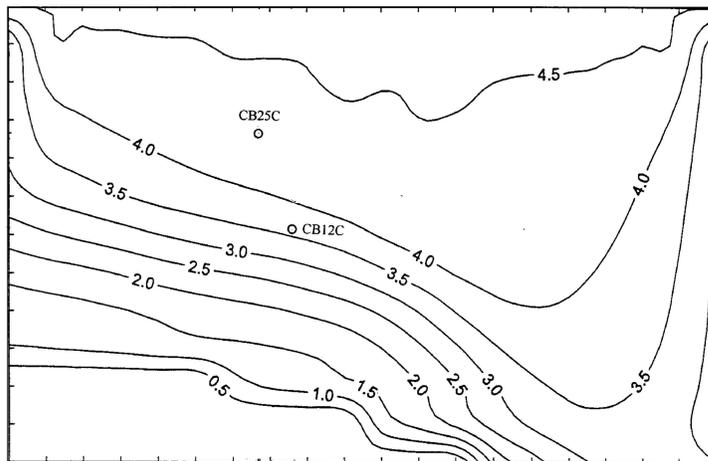


图 1 典型海上平台位置及 10 a 一遇有效波高分布示意图

Fig. 1 Locations of typical offshore platforms and distributions of 10 year return period significant wave height

半日潮波由黄海传入渤海, 形成 2 个左旋的半日潮波系统, 无潮点分别位于秦皇岛以东和现代黄河口以东; 日潮波在渤海存在 1 个左旋的全日潮波系统, 无潮点位于渤海海峡。埕岛油田海域的潮汐受以上潮波系统的综合影响, 呈现出多变和复杂的特性。埕岛海域是渤海湾和莱州湾海水交换的过渡区域, 又受黄河三角洲岸线的影响, 使得这里成为一强流区, 各层潮流流速相差不大, 潮流方向比较接近。在典型平台附近的流场观测结果表明, 典型平台所处位置涨潮流底层最大流速为 90 cm/s, 落潮流底层最大流速为 70 cm/s。

1.3 研究区底质特征

埕岛油田 40 m 以浅地层系由晚更新世和全新世的海陆相沉积物组成^[9]。黄河自 1976 年改道后, 波浪和潮流的侵蚀作用成为改造水下岸坡的主要动力因素, 控制了海底地貌的发育与演变, 塑造出一系列独具特

色的动态蚀退地貌类型。尤其是海底表层土体在波浪和潮流的长期作用下,原来标准的三角洲沉积地貌单元已蚀变为单一的粉土沉积^[10]。

工程地质调查表明, CB12C 及 CB25C 两组平台附近表层沉积物为废弃三角洲相的粉砂-粉土沉积(粒度组分见图 2),其下伏底层为潮滩相的淤泥质粘土。

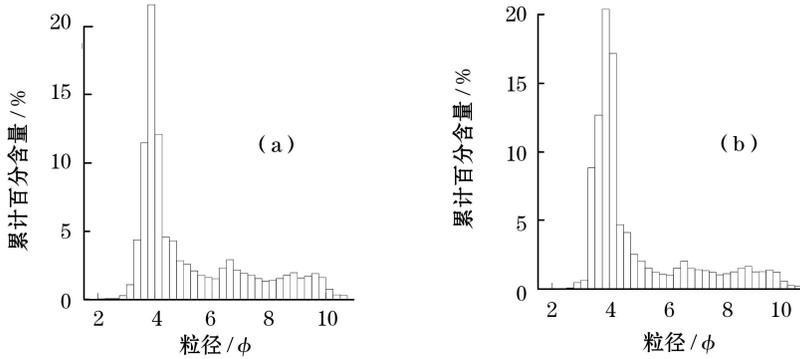


图 2 典型平台附近表层沉积物粒度组分

(a) CB12C 平台; (b) CB25C 平台

Fig. 2 Grain size fractions of surficial sediments near the typical platforms

(a) Platform CB12C; (b) platform CB25C

2 典型平台桩基冲刷过程

2 处典型平台多年监测所得的水深剖面资料分析表明,平台未建立前,即 1988-1994 年,研究区总体上受到冲刷,海底较为平坦。其中, CB25C 平台位置 6 a 间水深加深 1.3~1.4 m,年平均冲刷深度为 0.22 m, CB12C 平台位置 6 a 间水深变深 3.2 m,年平均冲刷深度达 0.53 m。平台建成后,桩柱改变了此区域原来的水力条件,致使桩基受到强烈的冲刷作用,平台附近 50 m 范围内逐渐形成以平台为中心的低洼的盆式地形。在平台建立之初的数个月至 1 a 内,对平台基础的冲刷最为剧烈,平均月冲刷量可达 0.1 m 以上。其中, CB25C 平台在 1997 年建成后 2 a 内平台中心最大冲刷深度达 1.8 m, CB12C 平台在 2001 年建成后一年半内平台中心最大冲刷深度达 2.0 m 左右。随着冲刷坑的发展,冲刷速率变缓,当冲刷到一定程度时,泥沙的输入与移出达到了相对平衡状态,继续淘深的现象已很少发生,只是随着风、浪、流及季节的变化而发生局部海底地形淤积或冲刷的交替变化。另外,从平台井口处一年半间的水深变化来看,冬季淤积夏季冲刷的规律也是比较明显的。在 2 个平台桩柱周围形成冲刷坑,形状包括梨形、不规则圆形和不规则椭圆形等。

观测结果表明, CB25C 和 CB12C 平台桩柱周围局部冲刷坑环状冲刷和角状冲刷均比较明显,冲刷坑在桩柱周围及其斜前方和斜后方均比较发育;平台建成初期,角状冲刷区冲刷态势较强,随着时间的推移,环状冲刷有所加大,进而达到冲淤的近似动态平衡状态。

当冲刷坑发展到一定阶段,潮流对其塑造能力降低,由桩基阻水产生的底流主要作用于冲刷坑周围的底床,形成沙纹达到动态冲刷平衡,其典型地貌形态如图 3 所示。在 CB25C 井组平台周围,微地貌类型有冲刷坑、冲刷沟槽、波纹状地形和海底平地等, CB12C 井组平台周围没有明显的沙纹出现,而代之以断续的沙斑,此现象说明平台桩基冲刷已趋于相对平衡。

通过分析桩基周围形成冲刷坑的形态,结合本区区域水深和动力条件,认为桩基周围所形成冲刷坑的形状主要由流场决定,冲刷坑长轴走向与流场方向基本一致。

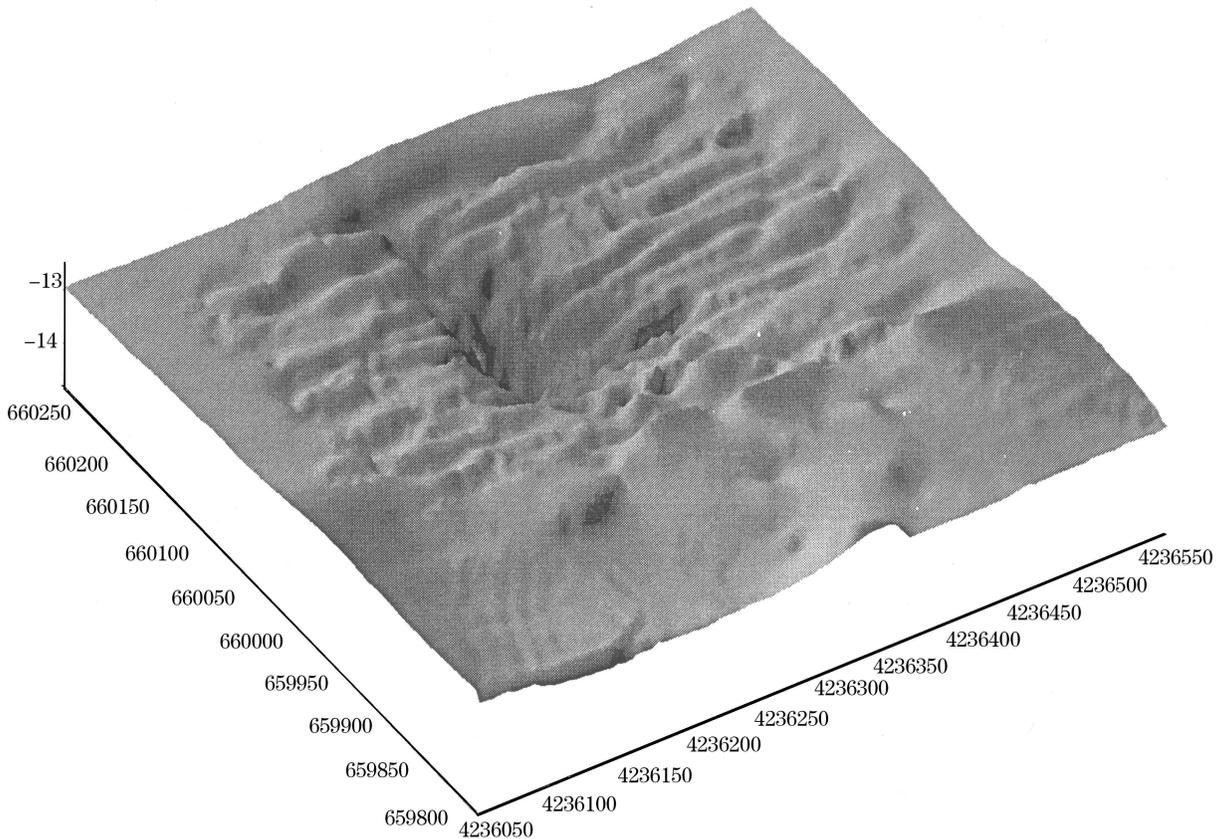


图3 典型平台桩基冲刷达动态平衡后的冲刷坑形态(EM3000多波束测量结果)

Fig. 3 Scour pit pattern around a typical platform pile foundation after reaching a scour and fill equilibrium (Measured results of EM3000 multibeam system)

3 典型平台桩基极限冲刷深度计算

现有的桩基极限冲刷深度计算经验公式较多,但多是在恒定流的前提下得出的,对于潮流及随机波浪考虑很少,因此计算结果与实测值存在较大偏差。本文选取 Richardson 和 Davis^[11] 以及 Jones 和 Sheppard^[12] 在潮汐汊道中得出的潮流作用下桩基极限冲刷深度计算经验公式,运用所选公式对埕岛油田典型平台桩基冲刷深度进行计算,并与实测结果比对以探讨其适用性。

Richardson 和 Davis 公式:

$$\frac{D_s}{d_p} = 2.0K_1K_2K_3K_4\left(\frac{D}{d_p}\right)^{0.35}Fr^{0.43}$$

Jones 和 Sheppard 公式:

$$\frac{D_s}{d_p} = c_2\left(\frac{V_{usb} - V}{V_\sigma}\right) + c_3$$

$$c_2 = (k - c_3)\left(\frac{V_{usb}}{V_\sigma} - 1\right)^{-1}$$

$$c_3 = 2.4tanh[2.18\left(\frac{D}{d_p}\right)^{2/3}]$$

$$k = \tanh[2.18(\frac{D}{d_p})^{2/3}][-0.279 + 0.049\exp(\lg \frac{d_p}{d_{50}}) + 0.78(\lg \frac{d_p}{d_{50}})^{-1}]^{-1}$$

式中, D_s 为桩基极限冲刷深度(m); d_p 为桩径, 典型平台均为 1.2 m; D 为水深(m); V 为底部最大平均流速(m/s); V_{cr} 为泥沙临界起动流速(m/s); V_{uspb} 为垂线平均流速(m/s); d_{50} 为泥沙颗粒中值粒径(m); $Fr = V/(gD)^{0.5}$, 为 Froude 参数; K_1, K_2, K_3 和 K_4 分别为与桩的形状、流桩接触角度、海底条件及泥沙颗粒尺寸对应的参数, 本次计算中均取 1。计算结果见表 1。

选取潮流作用下的桩基极限冲刷深度计算公式对埕岛油田 7 个典型平台进行计算, 计算结果与实测结果对比表明, 总体上 Richardson 公式计算结果比实测结果偏小, Jones 公式计算结果比实测值偏大。考虑到经验公式地域的差异, 将其相关参数进行适当修正后, 在埕岛海域仍有较好的适用性。

需要说明的是, 以上计算公式的选取只考虑海流对桩基的冲刷作用而忽略了波浪作用对桩基冲刷的影响。埕岛海域波浪主要为风成浪, 周期短, 波浪破碎时对海底形成较强的侵蚀作用。埕岛海域的破波带主要在 7 m 水深附近, 随着水深的增加, 波浪对海底的作用迅速减小。

CB25C 平台所处位置水深约为 10 m, 海底仍受到一定程度的波浪作用, CB12C 平台所处位置水深约 13 m, 波浪对海底的作用几可忽略不计。在波浪与海流的联合作用下, 将增大对海底的剪切作用, 桩基冲刷深度将相应增大。以上几处典型平台计算结果中, 在波浪作用较强区域, 实测结果比计算结果偏大, 忽略波浪的影响是其主因之一。

4 结 论

桩柱建立后, 在其周边形成的漩涡是桩基冲刷的主要动力。埕岛油田典型平台桩基冲刷监测资料分析结果表明, 平台建成后, 桩基冲刷比较剧烈, 月平均冲刷量约为 0.1 m, 随着时间推移, 桩基冲刷强度逐渐减弱, 达到冲淤的动态平衡状态。冲刷坑形状包括椭圆形、梨形以及不规则形状。

选用往复流作用下的桩基极限冲刷深度计算经验公式对埕岛油田典型平台桩基极限冲刷深度进行计算, 结果表明, 所选公式在埕岛海域具有较好的适用性。

参考文献(References):

- [1] PALMER H D. Wave induced scour on the sea floor[M]. New York: Proc., Civ. Engrg. in the Oc., ASCE, 1969.
- [2] SUMER B M, FREDSON J, CHRISTIANSEN N. Scour around a vertical pile in waves[J]. Journal of Waterway, Port, coastal and Ocean Engineering, ASCE, 1992, 118(1): 15-31.
- [3] SUMER B M, FREDSON J. Wave scour around a group of vertical piles[J]. Journal of Waterway, Port, coastal, and ocean Engineering, ASCE, 1998, 124(5): 248-256.
- [4] BAYRAM A, LARSON M. Analysis of scour around a group of vertical piles in the field[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 2000, 126(4): 215-220.
- [5] EADIER W, HERBICH J B. Scour about a single cylindrical pile due to combined random waves and current[M]. New York: Proc., 20th Coast. Engrg. Conf., ASCE, 1978.
- [6] KOBAYASHI T, ODA K. Experimental study on developing process of local scour around a vertical cylinder[M]. New York: Proc.,

表 1 经验公式计算与实测结果

Table 1 Calculated and observed results of ultimate scour depth

平 台	冲刷深度/m		
	Richardson 公式	Jones 公式	实测结果
CB12C	2.0	2.4	2.6
CB25C	2.2	2.3	2.4
CB6A	2.1	2.2	1.3
CB1A	2.1	2.8	2.2
CB1B	2.0	3.0	1.8
CB1C	2.1	2.8	2.0
CB11C	1.9	2.7	2.4

24th Coast. Engrg. Conf., ASCE, 1994.

- [7] BAYRAM A. Local scour around Iwakioki and Agaoki offshore platforms[M]. Tokyo: Rep., M. R. T. Consulting Co., 1997.
- [8] HERBICH J B. Scour around pipelines, piles and seawalls[M] // HERBICH J B. Handbook of coastal and ocean engineering. Vol. 2. Houston: Gulf Publishing Co., 1991: 45-79.
- [9] YANG Z S, WANG T, et al. Marine environment of the Chengdao oil field exploration and exploitation[M]. Qingdao: Ocean University of Qingdao Press, 1993. 杨作升, 王涛. 埕岛油田勘探开发海洋环境[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1993.
- [10] FENG X L, SHEN W Q, YANG R M, et al. Relation between the geotechnical characteristics of sediment and the sedimentary environment in the modern Yellow River estuary area[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1994, 24(3): 21-28. 冯秀丽, 沈渭铨, 杨荣民, 等. 现代黄河口区沉积环境与其沉积物工程性质的关系[J]. 青岛海洋大学学报, 1994, 24(3): 21-28.
- [11] RICHARDSON E V, DAVIS S R. Evaluating scour at bridges. Fourth Edition Hydraulic Engineering circular No. 18[R]. Atlanta: National Highway Institute, Federal Highway Administration, U S Department of Transportation, 2001.
- [12] JONES J S, SHEPPARD D M. Scour at wide bridge piers[C] // Proceedings of Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management. Minneapolis, Minnesota, USA: [s. n], 2000.

Calculation of Scour Process and Scour Depth Around an Offshore Platform Pile Foundation Under the Actions of Tidal Current

SUN Yong-fu^{1,2}, SONG Yu-peng², SUN Hui-feng², MA Jiang³

(1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;

3. Qingdao Ruiyuan Engineering Group Co., Ltd., Qingdao 266510, China)

Abstract: In this paper, multi-year water depth data observed in the typical platform areas of the Chengdao oil field are analyzed and studied, the scour process and the scour pit pattern and distributions around the platform pile foundation under the actions of tidal current are explored, and two empirical formulas are chosen to calculate the ultimate scour depths around the platform pile foundations. It is shown from the comparison between the calculated results and observed results that the chosen empirical formulas are applicable for the Chengdao sea area.

Key words: scour around pile foundation; eddy; scour depth; tidal current

Received: March 15, 2006