

海洋平台桩基周围冲刷过程及冲刷机理分析

孙永福^{1,2}, 宋玉鹏², 边淑华²

(1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100; 2. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要: 对埕岛油田典型平台周边多年的水深地形资料进行分析对比, 研究平台桩基周围冲刷过程, 探讨桩柱周围形成冲刷坑的冲刷深度、几何形态和分布特征, 分析其冲刷机理。结果表明, 平台建成初期桩基冲刷剧烈, 周围海底形成以平台为中心的盆状地形, 经历近 1 年的时间逐步达到冲淤平衡。冲刷坑形态特征主要由水动力条件控制。

关键词: 桩基周围冲刷; 冲刷坑几何形态; 冲刷机理

中图分类号: P753

文献标识码: A

文章编号: 1672-5174(2007)04-636-05

以桩柱结构为基础的石油平台在海洋工程中占据了很大的比重。平台的建立改变了此区域原来的水动力条件, 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, 会对周围的海底产生局部冲刷, 形成冲刷坑, 进而影响平台稳定性。桩基冲刷的问题最早在 1960 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局部冲刷速率, 得出了当土体的中值粒径范围在 0.12 ~ 0.63 mm 范围内时, 冲刷坑的形态和最大深度与土体特性无关的结论。1970 年代以后, 随着桩基冲刷问题越来越受关注, 对此领域的研究投入逐渐增多。Chow 和 Herbich^[2]通过室内试验研究了不同组合桩在波、流作用下的冲刷过程, 发现相对冲刷深度 S/H (S 为稳定后冲刷深度, H 为波高) 随着波陡 H/L 以及相对深度 h/gT^2 (L 为波长, h 为水深, g 为重力加速度, T 为波周期) 的增加而增大。Sumer 等^[3]通过细致的试验观测了单纯波浪作用下的圆桩基础的冲刷状况, 同时还考虑了时间比尺的影响。Atilla 和 Magnus^[4]通过对波浪作用下桩基冲刷长期监测所得数据进行分析, 认为桩柱周围形成冲刷坑的深度主要受参数 K_c 影响, 而对于冲刷坑的宽度, 则主要取决于桩的几何形状及海流的特征, 与其他参数无关。国内关于桩基冲刷的研究最早始于 1980 年代初, 首先是从栈桥式码头的桩基冲刷开始的。中国学者王汝凯^[5]与合作者在美国得克萨斯农工大学进行了波浪与恒定流联合作用下小直径桩柱周围的局部冲刷试验, 发现波流联合作用时的局部冲刷深度比单纯波或单纯流作用时的冲刷深度大, 提出了“普遍冲刷深度”、“局部冲刷深度”和“总冲刷深度”的概念, 并提出了最大冲刷深度计算公式。

目前对于桩基冲刷的研究由于现场监测数据缺乏, 主要通过模型试验来开展。现有的模型试验中, 很难能够依靠建立的比尺模型精确描述波浪、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, 同时在海洋工程中很难把模型试验得到的结果直接应用到设计中。将试验数据运用到工程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^[6]。另外, 对于试验得出的桩基最大冲刷深度计算公式, 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类型多以砂为主, 而对于底质为粉粘土的情况却所知甚少。

埕岛油田现有平台 70 余座, 年产石油 200 多万吨, 平台目前也面临着桩基冲刷的问题。国家海洋局第一海洋研究所于 1988 ~ 2000 年期间, 对黄河三角洲北部埕岛海域 CB25C 和 CB12C 2 个井组平台桩柱周围的局部和区块水深进行了多次测量, 并获取了底质、潮流等实测资料。本文通过运用以上资料, 对典型平台桩基冲刷过程及冲刷坑分布特征进行论述, 进而分析桩基冲刷机理。

1 研究区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,

118°43'E ~ 119°02'E, 38°06'N ~ 38°18'N, 油井分布范围达 500 km²。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。

埕岛油田现有 50 多座井组平台分布在水下岸坡和海底平原上, 平台的建立改变了附近海区原有的水动

力条件,对海底产生了较强烈的侵蚀作用,在受底质差异的影响下,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的 CB25C 及 CB12C 井组平台区水深地形资料以及地貌形态特征,重点讨论两组平台的桩基冲刷过程,并对桩基冲刷机理进行分析。

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 11.6 m 左右; CB12C 平台 2001 年建成,水深 8.6 m 左右(见图 1)。2 个井组平台均由井口平台、工艺平台和立管组成,井口平台由四根圆柱形桩柱支撑,桩柱直径 1.2 m(见图 2)。

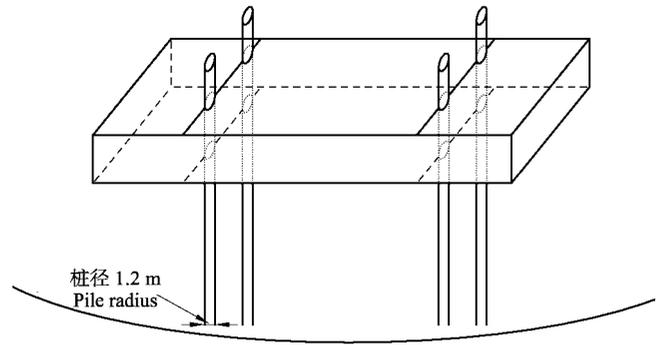


图 2 井口平台结构示意图

Fig. 2 Structure of the well head platforms

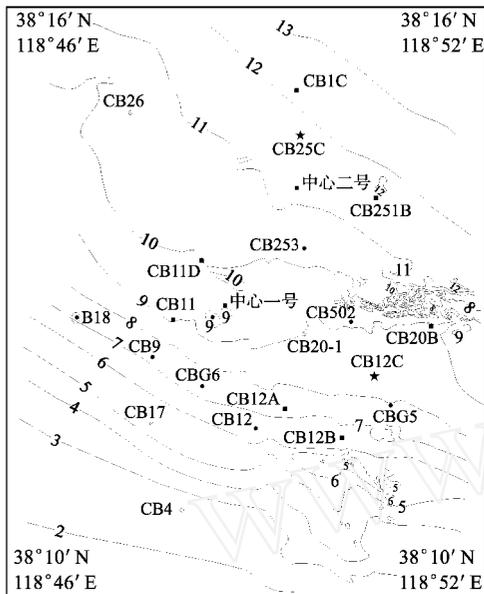


图 1 典型平台位置示意

Fig. 1 Positions of typical platforms

2 海洋动力特征

研究区海域位于半封闭的渤海内,西靠莱州湾,北邻渤海湾。在渤海口门外,有长山列岛阻隔,外海大浪不易侵入。因此,该海域的波浪主要是风成浪,具有生成快,消失也快,波周期 10 s 以上的大浪很少出现等特点。另外,受渤海上风场变化规律所制约,波浪具有明显的季节变化。根据国家海洋局第一海洋研究所多年对埕岛海域波浪情况的观测统计,结合典型平台所处位置,该海域最大月平均波高出现在冬季,最大值为 1.18 m,月平均最小值出现在夏季,最小值为 0.46 m。

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五号桩外;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

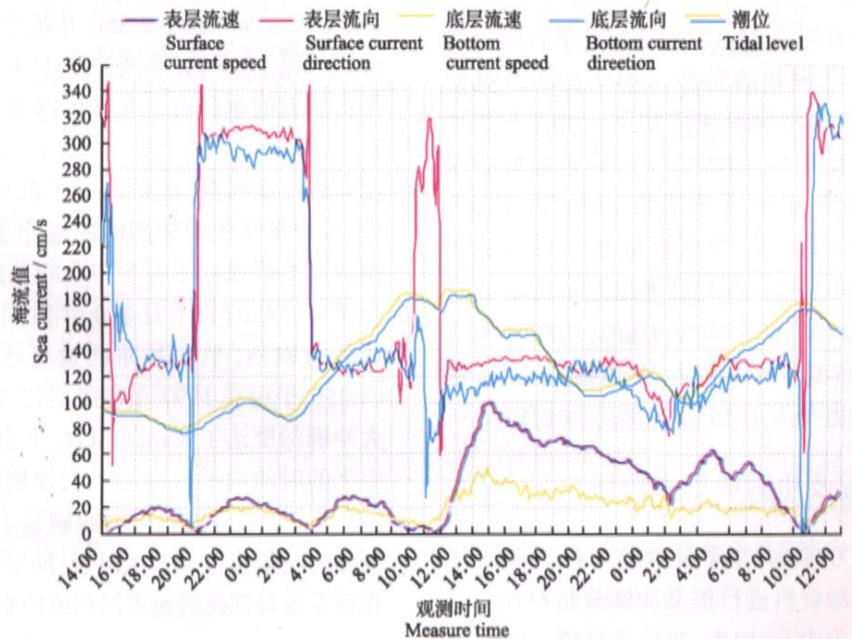


图 3 研究区实测潮流特征曲线

Fig. 3 Curves showing the tidal characteristics of the survey area

黄河三角洲岸线的影响,使得这里成为一强流区,各层潮流速度相差不大,潮流方向比较接近。通过在典型平台附近进行流场观测表明,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(见图 3,测流点位置为 38°14.9'N;118°51.3'E,观测时间为 2005-06-06)。

3 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。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^[7]。

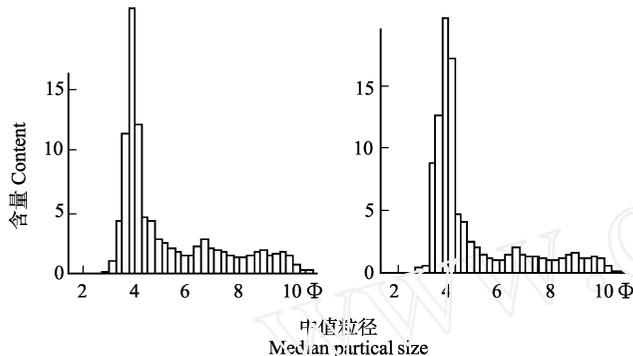


图 4 典型平台表层沉积物粒度组分

Fig. 4 Grain size distributions of superficial coastal deposits at typical platforms

(左为 CB12C、右为 CB25C Left for CB12C, Right for CB25C)

工程地质调查表明, CB12C 及 CB25C 平台附近表层沉积物为废弃三角洲相的粉砂~粉土沉积,(见图 4),其下伏底层为潮滩相的淤泥质粘土。根据收集到的典型平台附近钻孔资料, CB25C 平台附近海底表层为砂质粉土,含水量为 28%,粘聚力为 3 kPa,内摩擦角为 32.5(°);下伏土层为粘土,含水量为 46%,孔隙比为 0.93,抗剪强度为 11 kPa。CB12C 平台附近海底表层为粉土,含水量为 27%,粘聚力为 9 kPa,内摩擦角为 22(°);下伏土层为淤泥质粉质粘土,含水量为 43%,粘聚力为 7 kPa,内摩擦角为 1.1(°),孔隙比为 1.17。

4 桩基冲刷过程及冲刷坑形态特征

以 CB12C 及 CB25C 井组平台为研究重点,通过平台周边多年实测水深资料进行桩基冲刷分析对比。以典型平台所在位置为中心,向东、西向各延伸 100 m 布设剖面(见图 5 及图 6,平台处于剖面中心位置),井组平台桩基冲刷过程如下:

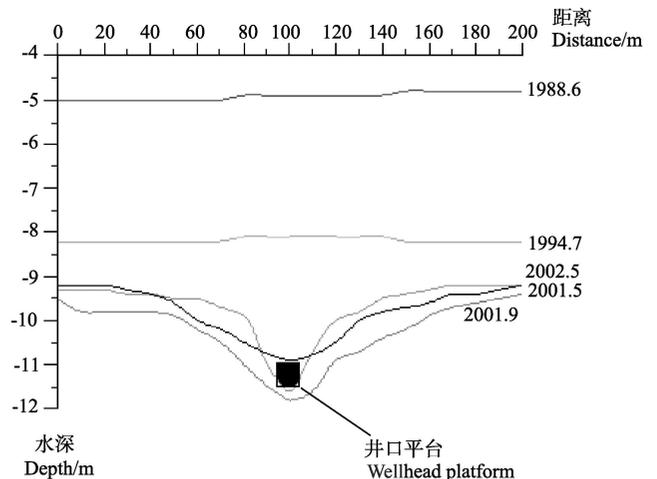


图 5 CB12C 井组平台东西剖面水深变化图

Fig. 5 Water depth variations along the east-west profile of Platform CB12C

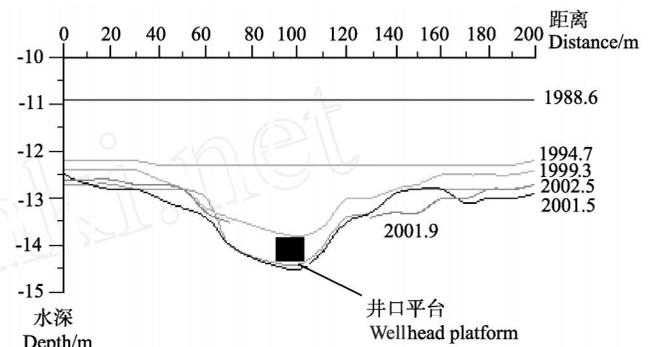


图 6 CB25C 井组平台东西剖面水深变化图

Fig. 6 Water depth variations along the east-west profile of Platform CB25C

(1) 在平台建立之前,平台海底普遍受到冲刷。从 1988-06~1994-07, CB25C 井组平台位置的水深由 11.0 m 刷深至 12.3 m,海底冲刷 1.3~1.4 m; CB12C 井组平台位置的水深由 5.0 m 刷深至 8.6 m,海底冲刷 3.6 m。

(2) 平台建成后,桩柱改变了此区域原来的水动力条件,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月至 1 年时间内,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 年时间内平台中心最大冲刷深度达 1.8 m, CB12C 平台在 2001 年建成后,1 年半的时间内平台中心最大冲刷深度达 2.0 m 左右。1 年半~2 年后桩基周围冲刷基本达到相对平衡,继续淘深的现象将很少发生,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。

(3) 从 2001-05~2002-09 的 1 年半时间对 CB25C 平台进行 4 次测量的水深变化来看,冬季淤积夏季冲刷的规律较为明显。对比发现,冲刷坑底处水深一般保持

冲刷或平衡,而冲刷坑边缘内侧边坡处相对容易淤积,特别是在冬季尤为明显。

根据平台所处位置的原始水深,确定 10 m 等深线为 CB12C 桩基冲刷坑外缘,13 m 等深线为 CB25C 桩基冲刷坑外缘。由各期等深线可见,CB12C 与 CB25C 冲刷坑的形状皆呈不规则的梨形或椭圆形,但主轴向有明显的差异(见图 7,图 8)。CB12C 冲刷坑主轴略呈 NE-SW 向,仅在 2001 年 9 月略显偏西;CB25C 冲刷坑主轴略呈 ESE-WNW 向。两平台桩基冲刷坑半径均约 30~50 m,CB25C 冲刷坑范围略大于 CB12C。历次测量结果相比,冲刷坑范围变化不大。

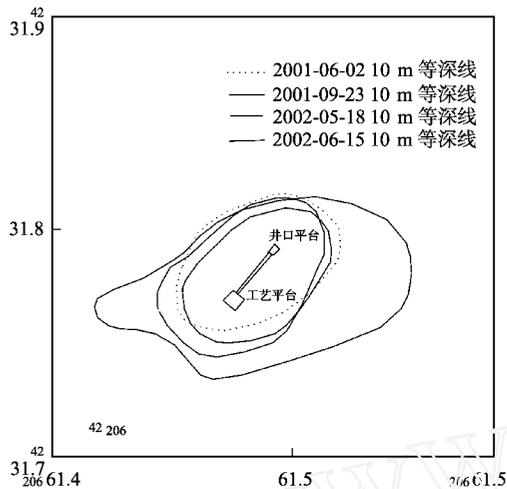


图 7 CB12C 平台历年冲刷坑范围及形状

Fig. 7 The scope and shape of scour pit around platform CB25C over certain years

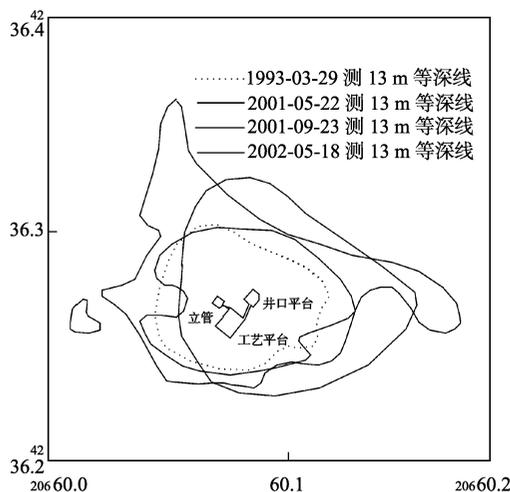


图 8 CB12C 平台历年冲刷坑范围及形状

Fig. 8 The scope and shape of scour pit around platform CB25C over certain years

5 机理分析

平台一旦建成,桩柱将会使此区域原来波浪、海流等水动力条件发生改变,打破原本已经建立的泥沙输

运平衡,从而使桩柱周围海底发生冲刷。海流遇到桩柱的阻碍发生绕流,桩柱周围流速加大,在桩柱周围形成的马蹄形漩涡以及桩柱后方的剥蚀漩涡是对桩基形成冲刷的主要动力。马蹄形漩涡形成的原因是来流剖面上的水质点发生旋转^[3]。当海底表层土颗粒所受重力及颗粒间粘结力无法抵御漩涡对其施加的作用力,则土颗粒发生起动,从而在桩柱周围形成了冲刷坑,桩柱两侧流体流动时发生绕流,流速加大,将会使已起动的泥沙处于悬浮状态。桩柱后方的水质点发生裂流,形成向海面运动的尾流,进而将泥沙颗粒带出冲刷坑。在波浪的联合作用下,更有利于漩涡的形成与发展。当漩涡紊流带走的泥沙总量与推移质和悬移质带入冲刷坑的泥沙总量相等时,冲刷坑就达到了平衡,冲刷停止,这时冲刷坑保持稳定的形状。

分析对比发现,CB12C 与 CB25C 井组平台所处的水动力条件不同是造成冲刷坑主轴向有明显差异的主要原因。CB25C 近底最大海流流速为 1.04 m/s,较 CB12C 的 0.88 m/s 大(见表 1),冲刷坑主轴略呈 ESE-WNW 向,与主流向基本一致,说明其主要受海流控制。CB12C 水深较浅,波浪作用较强,而海流流速相对较小,冲刷坑主轴略呈 NE-SW 向,与强浪向基本一致,说明其受波浪影响较大,而受流的作用较小。

表 1 典型平台桩基冲刷情况与水动力条件对比

Table 1 Pile foundation scour status of typical platforms contrasted with hydrodynamics conditions

| 项目 Item | 水深 Water /m | 冲刷坑 Scoupt | | 近底最大可能 流速/ $m\ s^{-1}$ Max bodlom currant speed | 波浪作用 Wave action | |
|------------|-------------------|-------------------|---------------------------------------|--|---------------------|-----------------|
| | | 深度 Depth /m | 范围 范围 /m 主轴方向 Orientation | | 强度 strength | 方向 direction |
| CB12C | 9.6 | 2.0 | 30 NE-SW | 0.88(ESE-WNW) | 较强 | NE |
| CB25C | 12.6 | 2.3 | 50 ESE-WNW | 1.04(ESE-WNW) | 较弱 | NE |

6 结语

平台的建立改变了区域水动力条件,在桩柱周边形成的漩涡是桩基冲刷的主要动力。通过对埕岛油田典型平台桩基冲刷监测结果分析,平台建成初期,桩基冲刷比较剧烈,形成以桩柱为中心的盆式地形,随着时间推移,桩基冲刷强度逐渐减弱,经历 1 a 左右的时间达到冲淤的动态平衡,最大冲刷深度超过 2 m。冲刷坑形态包括椭圆形及梨形,主轴向及形态特征主要受水动力条件控制。

参考文献:

[1] Palmer H D. Wave induced scour on the sea floor [M]. New York:

- Proc Civ Engrg. ASCE, 1969: 703-716.
- [2] Chow W Y, Herbich J B. Scour around a group of piles. [C] [s.1.]: Proc, Offshore Technol. Conf. 1978.
- [3] Sumer, B M, Fredsoe J, Christiansen N. Scour around a vertical pile in waves [J]. J Wtrwy Port Coast, and Oc Engrg, ASCE, 1992, 118(1): 15-31.
- [3] Sumer B M, Fredsoe J. Wave scour around group of vertical piles [J]. J Wtrwy, Port Coast, and Oc Engrg, ASCE, 1998, 124(5): 248-256.
- [4] Atilla Bayram, Magnus Larson. 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] 王汝凯, 神仙沟(桩 11) 建油港的冲淤问题 [J]. 港口工程, 1983, 4(2), 32-37.
- [6] Kobayashi T, Oda K. Experimental study on developing process of local scour around a vertical cylinder [M]. New York: Proc, 24th Coast. Engrg. Conf., ASCE, 1994. 1284-1297.
- [7] 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, 75-83.

Scour Process Around the Pile Foundation of Marine Platforms and Analysis of Scour Mechanics

SUN Yong-Fu^{1,2}, SONG Yu-Peng², BIAN Shu-Hua²

(1. College of Marine Geoscience, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

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

Abstract: To study the scour process of platform pile foundation, the water depth data over a number of years for typical platform circumjacent zones of Chengdao Oil Field were analyzed. The shape and distribution character of scour pits around piles were discussed and the scour mechanics of pile foundation was analyzed. The results indicated that the pile foundation scoured significantly at the initial stage, the seafloor around the platform became basin-shaped and the platform pile foundation achieved scour-and-fill equilibrium after one year. The shape character of scour pits was controlled by hydrodynamic conditions.

Key words: scour around pile foundation; shape of scour pits; scour mechanics

责任编辑 徐环