

埋藏古河道对海洋石油平台安全性的影响研究

——以渤海某油田开发项目为例

薄 昭¹, 余 稳², 周新刚¹, 李翔云¹, 吴景健¹

(1. 中海石油(中国)有限公司 天津分公司, 天津 300452; 2. 中海油田服务股份有限公司, 天津 300452)

摘 要:埋藏古河道作为一种灾害性地质特征,可能对钻井平台就位、海上桩基的打入及桩基安全造成不利影响。渤海某油田开发项目在工程物探调查中发现现在预定平台位置处有埋藏古河道。为保证油田顺利开发,开展了埋藏古河道对海洋石油平台安全性的影响研究。通过埋藏古河道对钻井平台就位的影响分析,对桩的可打入性的影响分析和对桩基承载力的影响分析,成功探索出了油田开发项目中遇到埋藏古河道的解决思路。该灾害性地质特征的成功论证,既保证了该项目的顺利进行,又探索出了油田开发项目中遇到该问题的解决思路,对我国海洋石油的开发有借鉴意义。

关键词:埋藏古河道;油田开发;灾害性地质特征

中图分类号:P642

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2018)03-0057-07

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2018.03.007

渤海海峡是黄渤海物质交换的通道,地质条件复杂,存在多种灾害性地质特征^[1],具体包括潮流沙脊、浅层气、埋藏古河道、活动断层、不规则基岩等,这些灾害性地质特征都可能对海洋资源开发和海上工程建设带来严重威胁^[1-2]。伴随着渤海油气资源的不断开发,尤其在边际油田数目不断增多的情况下,更加安全、高效、经济地完成海洋工程建设显得尤为重要^[3]。埋藏古河道作为一种灾害性地质特征,其沉积物多具有复杂性、多变性,其物理和力学性质在水平方向存在较大差异、持力不均,对工程危害较大,埋藏古河道可能对钻井平台就位、海上桩基的打入及桩基安全造成不利影响^[4-6]。

1 研究内容概况

某渤海油田开发项目作为渤海边际油田开发过程中具探索意义的项目,拟在平台预定位置处新建一座独腿三桩的简易井口平台。勘查过程中,在预定平台位置发现了埋藏古河道,针对该灾害性地质条件,分析讨论出了 2 种解决方案:第 1 方案是分析该埋藏古河道可能造成的影响,并进行详细的论证;第 2 方案是协调油藏和钻完井等进行海洋平台移位。第 1 方案是优先方案,它需要全面地分析该灾害性地质特征可能造成的各种不利影响,若该影响可以接受或有避免措施则可以继续推进油田开发,若该影响不可接受则需要采用第 2 方案。第 2 方案需要重新进行选址及勘察等工作,不仅会增加油田开发投资的投资成本,而且可能会对油藏产量造成不利影响。本研究优先选择了第 1 方案,根据工程物探资料对该场址内埋藏古河道的分布及埋藏深度进行了详细的解释,分析评价了本场址埋藏古河道对钻井平台就位、钢桩打入及桩基安全的影响,并提出了合理的建议。本文对埋藏古河道的研究结果对今后我国海洋石油的开发具有参考意义,特别是对渤海边际油田的开发具有探索价值。

收稿日期:2018-04-04

作者简介:薄 昭(1989-),男,工程师,硕士研究生,主要从事海洋石油开发方面研究. E-mail: bozhao@cnooc.com.cn

(王佳实 编辑)

2 埋藏古河道现象

根据工程物探调查资料对该场址内埋藏古河道的分布及埋藏深度进行了解释,在该项目平台场址调查区域解释深度范围内(海底至海底以下约 100 m)的地层中发现 2 处埋藏古河道 C1 和 C2。埋藏古河道 C1 位于调查区域中部,顶部埋深约 2 m,底部埋深在 2~10 m 变化,预定平台中心位置位于埋藏古河道内部,距离埋藏古河道 C1 边缘最近约 85 m。埋藏古河道 C2 位于调查区域西南部,顶部埋深约 2 m,底部埋深在 2~10 m 变化,预定平台中心位置位于埋藏古河道外部,距离埋藏古河道 C2 边缘最近约 141 m。埋藏古河道的分布见图 1,埋藏 C1 深度见图 2。

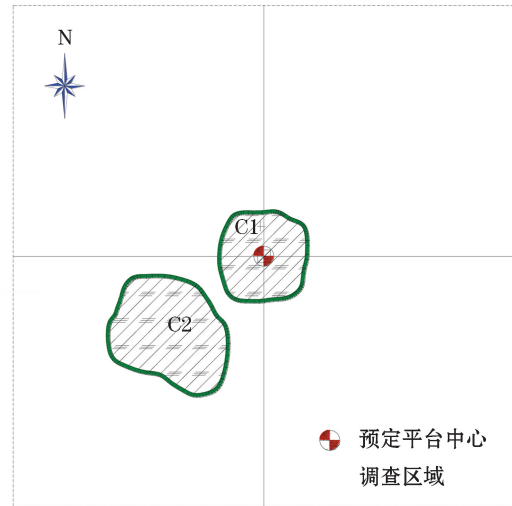


图 1 埋藏古河道平面分布

Fig.1 The horizontal distribution of the buried ancient channels

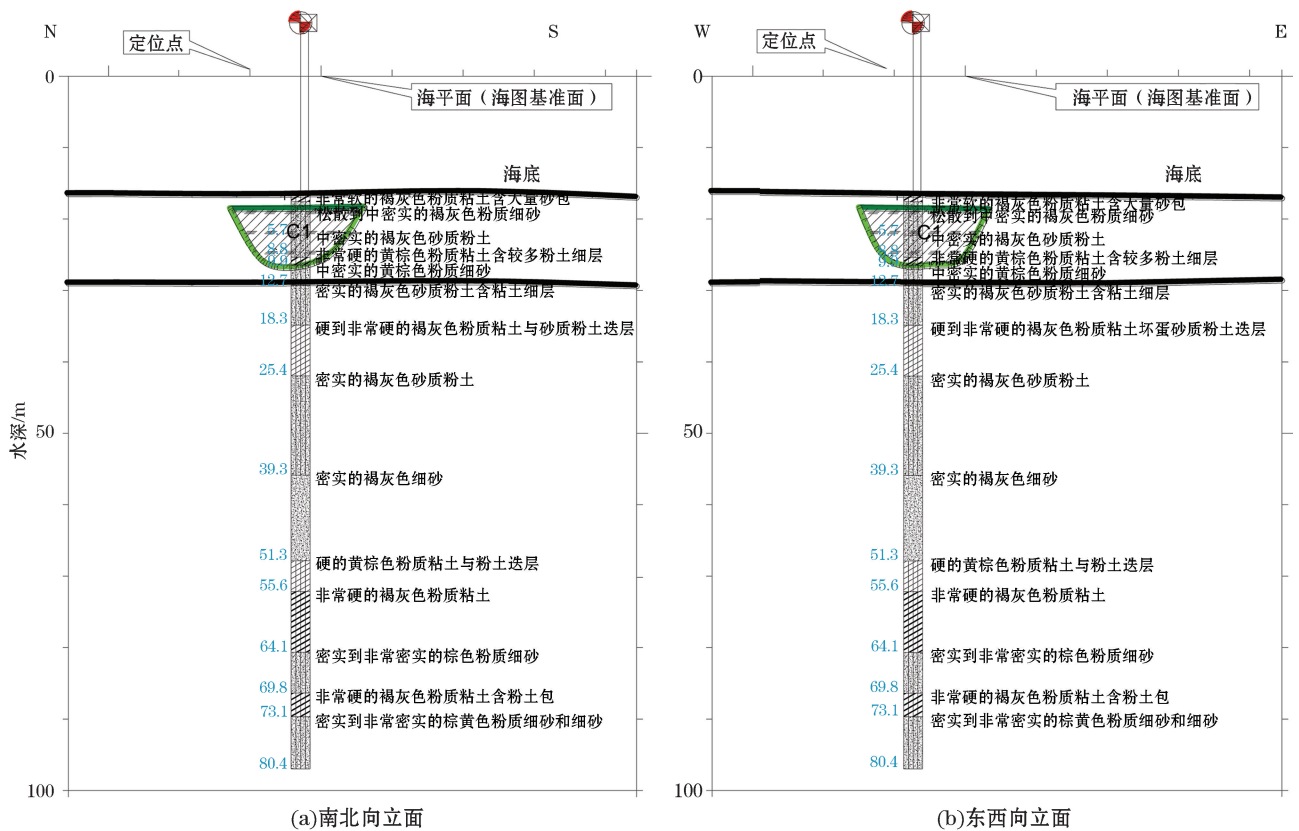


图 2 埋藏古河道 C1 解释剖面

Fig.2 Interpreted profiles of the buried ancient channels

3.1 对钻井平台就位的影响分析

根据物探解释资料,该项目平台中心位置位于埋藏古河道内部,距离埋藏古河道 C1 边缘最近约 85 m,埋藏古河道顶部埋深约 2 m,底部埋深在 2~10 m 变化,钻井平台就位时各桩腿为主处的土质特征可能存在不均匀性,导致各桩腿入泥深度变化。

本研究基于工程地质勘查的土壤资料(0~40 m)进行钻井平台就位插桩深度分析,该深度范围内的土质主要由粒状土夹薄层黏性土组成。海底表层至约 1.0 m 深度范围内土质为黏性土,设计不排水抗剪强度为 5 kPa,深度范围内其余详细的土质设计参数见表 1。

表 1 设计参数表
Table 1 Design parameter table

层 号	土质描述	深度/m		水下容重 /kN·m ⁻¹	设计抗剪强度 /kPa	粒状土 设计参数(Φ)	承载力系数	
		层顶	层底				N_q	N_r
1	非常软的粉质黏土	0.0	1.0	8.7	5.0			
2	松散到中密实的粉质细砂	1.0	5.7	9.6		25°	10.7	10.9
3	中密实的砂质粉土	5.7	8.8	9.5		25°	10.7	10.9
4	非常硬的粉质黏土	8.8	9.9	9.6	133.0			
5	中密实的粉质细砂	9.9	12.7	8.7		30°	18.4	22.4
6	密实的砂质粉土	12.7	18.3	8.9		30°	18.4	22.4
7	硬的粉质黏土与砂质粉土迭层	18.3	23.3	9.2	90.0	25°	10.7	10.9
8	非常硬的粉质黏土与砂质粉土迭层	23.3	25.4	9.6	155.0	30°	18.4	22.4
9	密实的砂质粉土	25.4	39.3	9.8		30°	18.4	22.4

注:空白处无数据

该项目的钻井平台初步锁定海洋石油 921 号。海洋石油 921 号钻井平台为三腿自升式移动钻井平台,其桩靴式基础的最宽部分面积为 156.3 m²,等效直径为 14.1 m。预压载时,每只桩靴的最大预压载为 42.2 MN(4 306 t)。

本研究使用 Skempton、Terzaghi and Peck 等方法进行了插桩分析计算,排水粒状土(硅质土)的承载力系数(N_q 和 N_r)的典型值使用的是 API RP 2A 中关于浅基础的推荐值。通过对工程地质土质资料进行分析,结果表明在 42.2 MN 的最大预压载下,海洋石油 921 号钻井平台桩靴尖部入泥深度为 1.9 m(图 3),在该深度处无刺穿的危险。

预定钻井平台在有埋藏古河道的地质情况下,钻井平台桩靴尖在最大预压载下的入泥深度为 1.9 m,满足要求。针对该场址特殊的地质条件,我们对就位作业的钻井平台提出了针对性的建议:

- 1) 钻井平台在该场址就位时桩靴尖部入泥深度相对较浅,存在侧滑的可能,建议对钻井平台横向稳定性进行校核,请钻井平台操作者做好相关的预防措施;
- 2) 由于有埋藏古河道的存在,钻井平台就位时各桩腿位置处土质特性可能存在不均匀性,导致各桩腿入泥深度变化。
- 3) 钻井平台在就位时应随时保持接近水面,尽量缓慢加载,在压载结束后,平台应保持低气隙观察一段时间,待稳定后,再继续作业。

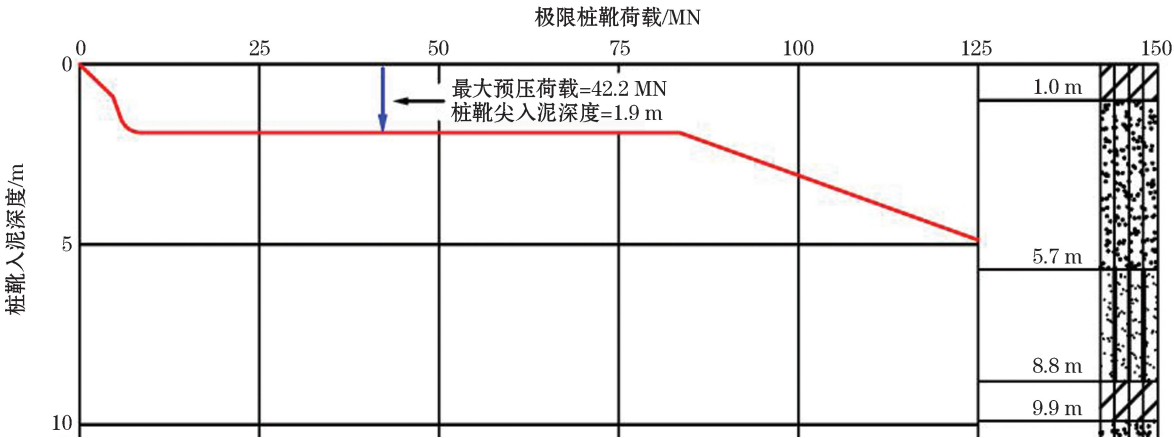


图 3 极限桩靴荷载与桩靴尖入泥深度关系曲线

Fig.3 The curve of the ultimate pile boot load versus the pile toe penetration depth

3.2 对桩的可打入性的影响分析

本研究打桩分析是通过 GRLWEAP2010 程序软件来进行的,运用 GRLWEAP2010 程序软件需要输入土、锤和桩的参数。土壤参数来自工程地质勘查资料(表 2),单位表面摩擦力和单位状端承载力是按 API RP 2A 方法计算得出的。根据桩身尺寸,液压锤选定为 IHC S-280 型锤,锤的参数包括锤效和恢复系数等。在分析中,假设液压锤 IHC S-280 型锤的锤效为 90%,并以此来评价锤的适用性。恢复系数根据以往对监测桩的资料进行分析选择。土的阻尼及弹性变形参数选用 Roussel^[7]推荐的数值。

波动方程分析结果见表 3。波动方程分析结果以可克服的打入阻力与锤击数关系曲线形式为图 4。

桩的可打入性分析结果表明:在正常作业连续打桩情况下,在该项目平台场址,对于 1 067 mm(42 in.) 直径钢管桩,用 IHC S-280 型打桩锤进行打桩时,可将其打入 45.0 m 的设计入泥深度。满足要求,在预定深度内未拒锤。为了减少安装问题,建议在打桩期间对桩的安装进行监测,以便获得锤的性能参数,以及评价桩的可接受性或在万一出现未预见的打桩情况时为确定补救办法提供参考。

表 2 轴向桩承载力设计参数表
Table 2 Design parameters for axial pile bearing capacity

层 名	土质描述	深度/m		有效重度 /kN·m ⁻³	设计抗剪强度 /kPa	单位表面摩擦力/kPa		单位桩端承载力/MPa	
		层顶	层底			层顶	层底	层顶	层底
1	非常软的粉质黏土	0.0	1.0	8.7	5	0	3	0.04	
2	松散到中密实的粉质细砂	1.0	5.7	9.6	$\delta=20^{\circ}, f_{\max}=67.0 \text{ kPa}$ $N_q=12, q_{\max}=2.9 \text{ MPa}$	3	16	0.10	0.65
3	中密实的砂质粉土	5.7	8.8	9.5	$\delta=20^{\circ}, f_{\max}=67.0 \text{ kPa}$ $N_q=12, q_{\max}=2.9 \text{ MPa}$	16	24	0.65	1.00
4	非常硬的粉质黏土	8.8	9.9	9.6	133	59	61	1.20	
5	中密实的粉质细砂	9.9	12.7	8.7	$\delta=25^{\circ}, f_{\max}=81.0 \text{ kPa}$ $N_q=20, q_{\max}=4.8 \text{ MPa}$	35	44	1.88	2.36
6	密度的砂质粉土	12.7	18.3	8.9	$\delta=25^{\circ}, f_{\max}=81.0 \text{ kPa}$ $N_q=20, q_{\max}=4.8 \text{ MPa}$	44	63	2.36	3.36

续表

层 名	土质描述	深度/m		有效重度 /kN·m ⁻³	设计抗剪强度 /kPa	单位表面摩擦力/kPa		单位桩端承载力/MPa	
		层顶	层底			层顶	层底	层顶	层底
7	硬的粉质黏土 与砂质粉土迭层	18.3	23.3	9.2	$\delta=20^{\circ}, f_{\max}=67.0$ kPa $Su=90$, Clay EB	49	62	0.81	
8	非常硬的粉质黏土与 砂质粉土迭层	23.3	25.4	9.6	$\delta=25^{\circ}, f_{\max}=120.0$ kPa $Su=155$, Clay EB	80	81	1.39	
9	密实的砂质粉土	25.4	26.0	9.8	$\delta=25^{\circ}, f_{\max}=81.0$ kPa	81		4.68	4.80
		26.0	39.3	9.8	$N_q=20, q_{\max}=4.8$ MPa	81		4.80	
10	密实的细砂	39.3	51.3	9.8	$\delta=30^{\circ}, f_{\max}=96$ kPa $N_q=40, q_{\max}=9.6$ MPa	96		9.60	
11	硬的粉质黏土与 粉土迭层	51.3	55.6	8.8	$\delta=25^{\circ}, f_{\max}=81.0$ kPa $Su=90$, Clay EB	81		0.81	
12	非常硬的粉质黏土	55.6	61.1	9.4	115	115		1.03	
		61.1	64.1	9.8	150	147	150	1.35	
13	密实到非常密实的 粉质细砂	64.1	69.8	9.5	$\delta=30^{\circ}, f_{\max}=96$ kPa $N_q=40, q_{\max}=9.6$ MPa	96		9.60	
14	非常硬的粉质黏土	69.8	73.1	9.4	155	150		1.39	
15	密实到非常密实的 粉质细砂	73.1	80.4	9.5	$\delta=30^{\circ}, f_{\max}=96$ kPa $N_q=40, q_{\max}=9.6$ MPa	96		9.60	

注:空白处无数据; Clay EB 表示桩端承载力按黏土强度参数计算; Su 为黏性土的设计不排水抗剪强度; δ 为粒状土的设计土一桩摩擦角; $f_{\max}$ 为单位表面摩擦力极限值; $q_{\max}$ 为单位桩短承载力极限值

表 3 波动方程分析结果

Table 3 Wave equation analysis results

最大压应力/MPa		拒锤深度/m		自沉深度/m	
无土塞	有土塞	无土塞	有土塞	不带锤	带锤
193.020	193.024	>45	>45	5.0	5.8~8.3

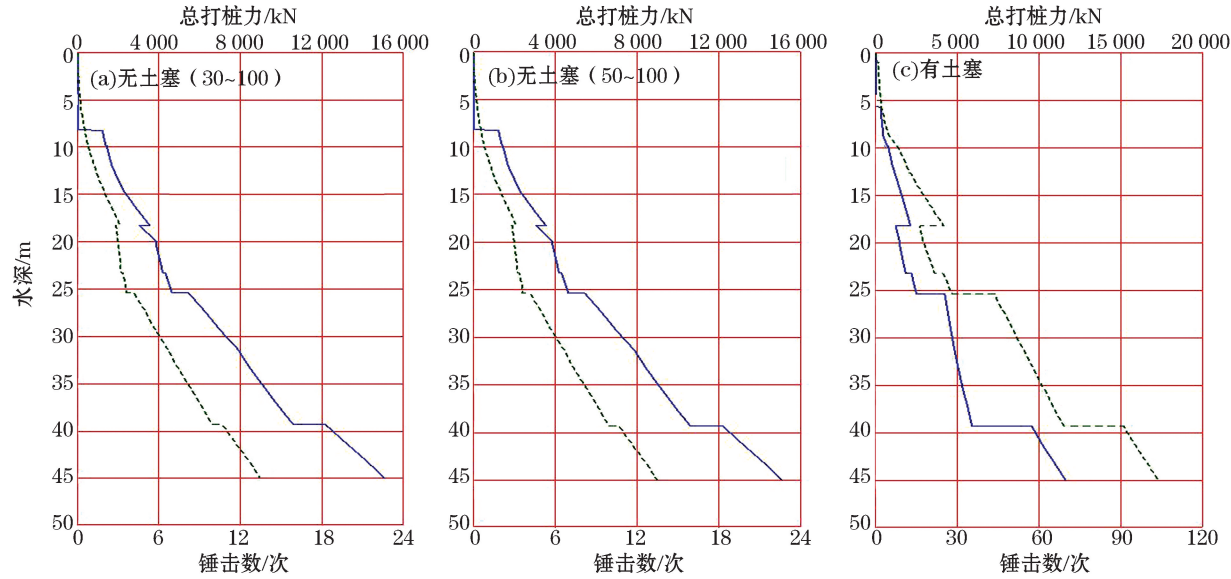


图 4 桩的可打入性分析结果

Fig.4 Analysis results of the penetration of piles

3.3 对桩基承载力分析的影响分析

导管架海洋平台桩基础是结构的重要组成部分,该项目拟在预定平台位置处新建一座独腿三桩的简易井口平台。上部结构有一层主甲板和一层操作甲板(图 5)。桩的尺寸为外径 1 067 mm,壁厚 38(或 50) mm,导管架设计入泥深度为 45 m。通过桩基承载力曲线可知,40~50 m 范围内为良好的持力层。设计桩结构在 45 m 处的极限桩基承载力为 17 660 kN,本研究需要通过结构设计验证在包括埋藏古河道的土壤中桩基的承载力安全系数是否满足要求^[8-10]。

根据平台场址轴向桩承载力设计参数表(表 2)和桩基承载力安全系数评估结果(表 4),可知极端工况和操作工况最大桩头力均出现在冰工况下的 3 号桩腿。在操作工况下最大桩头力为 OIH7(是 270°冰工况环境组合)工况下的 2 851.9 kN,在设计入泥深度 45 m 处安全系数为 5.14,满足 API 规范要求;在极端工况下最大桩头力为 EIH7(是 270°冰工况环境组合)工况下的 4 574.3 kN,在设计入泥深度 45 m 处安全系数为 3.43,满足 API 规范要求。

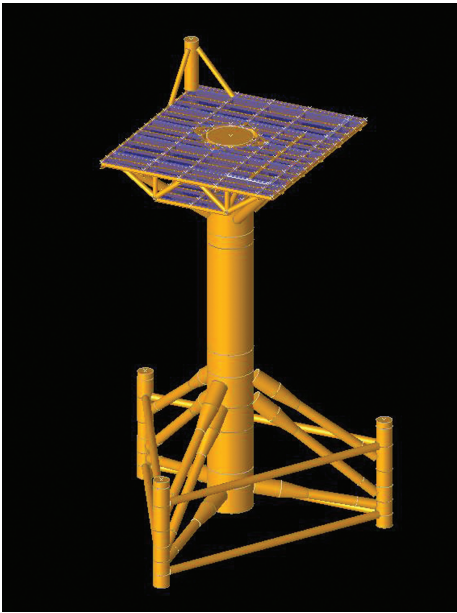


图 5 打桩分析
Fig.5 Piling analysis

表 4 桩基承载力安全系数评估

Table 4 Safety factor evaluation of the bearing capacity of pile foundation

工 况	桩编号	极限荷载/kN		自 重 /kN	设计荷载/kN		安全系数 压缩	API 规范 安全系数	结 论
		压缩	拉伸		工况	压缩			
操作工况	1	17 660	9 060	580.9	OIH2	-2 845.4	5.15	2.0	满足
	2	17 660	9 060	580.9	OIH4	-2 469.1	5.79	2.0	满足
	3	17 660	9 060	580.9	OIH7	-2 851.9	5.14	2.0	满足
极端工况	1	17 660	9 060	580.9	EIH2	-4 523.5	3.46	1.5	满足
	2	17 660	9 060	580.9	EIH4	-4 138.7	3.74	1.5	满足
	3	17 660	9 060	580.9	EIH7	-4 574.3	3.43	1.5	满足

4 结 论

项目在发现预定平台位置处有埋藏古河道(灾害性地质特征)后,结合该埋藏古河道位置处的详细地质和物探资料,进一步展开了钻井平台就位分析、桩的可打入性分析和桩基承载力分析。结果表明:

1)由于埋藏古河道存在的,钻井平台各桩腿入泥深度可能存在差异,钻井平台就位作业时,操作者需要随时密切关注各桩腿入泥深度,在海洋石油 921 钻井平台最大预压载下,其桩靴尖最终入泥深度满足要求,且该深度处无刺穿风险;

2)由于埋藏古河道埋藏深度相对较浅,其对钢桩的可打入性没有影响,且选定的打桩锤不存在拒锤风险;

3)由于埋藏古河道埋藏深度相对较浅,且桩基设计入泥深度处为良好的持力层,本项目桩基承载力满足规范要求。

本项目中对埋藏古河道问题的成功解决,对今后渤海油田开发过程中类似的问题提供了工程借鉴实例。

参考文献 (References):

- [1] CHEN X H, ZHANG X H, LI R H, et al. A preliminary study on hazardous geology in the Bohai Strait[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014(1): 11-19. 陈晓辉, 张训华, 李日辉, 等. 渤海海峡海域灾害地质研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014(1): 11-19.
- [2] WANG Y F. Assessment on engineering geological suitability in northern Liaodong Bay[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, SOA, 2014. 王忆非. 辽东湾北部工程地质条件评价[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2014.
- [3] ZHU J B, LIANG C. Current status, challenges and countermeasures of marginal oilfield development technology[J]. *Chemical Management*, 2016(12): 50. 朱建斌, 梁臣. 边际油田开发技术现状、挑战与对策[J]. *化工管理*, 2016(12): 50.
- [4] XIE B, TAN Y, WANG C S. Discussion on design philosophy of minimal platform for marginal oil field exploration[J]. *Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2017(4): 1-4. 谢彬, 谭越, 王春升. 边际油田开发的简易平台设计原则探讨[J]. *船舶与海洋工程*, 2017(4): 1-4.
- [5] YAN S W, ZHOU H J, LIU R, et al. Reliability analysis on vertical stability of pile foundations of ocean structures[J]. *The Ocean Engineering*, 2004(1): 19-24. 闫澍旺, 周宏杰, 刘润, 等. 海工结构物桩基础竖向稳定性的可靠度分析[J]. *海洋工程*, 2004(1): 19-24.
- [6] GONG X D, WEI H W, QI F Q. Characteristics of marine engineering geology in the northern Liaodong Bay shallow water area[J]. *Coastal Engineering*, 2006(2): 47-54. 龚旭东, 魏宏伟, 齐发庆. 辽东湾北部浅海区海洋工程地质特征[J]. *海岸工程*, 2006, 25(2): 47-54.
- [7] ROUSSEL H J. Pile driving analysis of large diameter high capacity offshore pipe piles[D]. Louisiana: Tulane University, 1979.
- [8] LI L F, XU W B, SUN Z P. Evaluation method and application study on the loading capacity of the pile foundation after the slip pile[J]. *Offshore Oil*, 2015(3): 102-107. 李利飞, 许文兵, 孙振平. 导管架钢桩溜桩后桩基承载力评估方法及应用研究[J]. *海洋石油*, 2015(3): 102-107.
- [9] American Petroleum Institute. Recommended practice for planning, designing, and constructing fixed offshore platforms-working stress design[M]. Washington D C: API Publishing Services, 2014.
- [10] Editorial Board of Offshore Engineering Design Guide. Structural design of offshore oil engineering platform[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010. 海洋石油工程设计指南编委会. 海洋石油工程平台结构设计[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.

Study on the Impact of Buried Ancient Channels on Offshore Oil Platform Safety: Case Study of a Project in Bohai Oilfield

BO Zhao¹, SHE Wen², ZHOU Xin-gang¹, LI Xiang-yun¹, WU Jing-jian¹

(1. TianJin Branch, CNOOC China Limited, Tianjin 300452, China;

2. China Oilfield Services Limited, Tianjin 300452, China)

Abstract: As a disastrous geological feature, the buried ancient channel may cause adverse effects on drilling platform in position, piling in the sea and pile foundation safety. It is found in the engineering geophysical survey of the oilfield development in the Bohai Sea that buried ancient channels are present at the pre-determined platform location. To ensure the smooth development of the oilfield, a study of the impact of buried ancient channels on offshore oil platform safety is carried out. By analyzing the impact of the buried ancient channels on drilling platform in position, penetration of piles and bearing capacity of pile foundation, the ideas to solve the problem of buried ancient channels which may be encountered in the implement of an oilfield development project have been explored successfully. This successful argumentation of such a disastrous geological feature has reference significance for the development of offshore oil in China.

Key words: buried ancient channel; oilfield development; disastrous geological feature

Received: April 4, 2018