

洋口港 LNG 码头栈桥沿程桩基局部冲刷分析

曾成杰, 陆培东, 王艳红, 陈可峰

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 洋口港 LNG 码头栈桥工程位于西太阳沙人工岛东北侧海域, 水流条件复杂, 海床泥沙活动性强, LNG 栈桥建成后沿程桩基周围即产生不同规模的冲刷坑。通过对比栈桥建设前后海床地形变化, 分析了桩基冲刷坑形成、发展过程。结合工程海域水沙动力环境, 阐明了桩基冲刷坑分布规律、原因, 总结出强潮流粉沙质海岸工程建设所引起的局部冲刷一般规律。研究结果表明: LNG 栈桥沿程桩基冲刷形态分布与涨、落潮优势密切相关, 而冲刷范围与强度则受流速大小和桩基规模的影响。冲刷坑早期发展迅速, 在平面形态基本稳定后仍有进一步冲深的可能, 应采取适当的工程护底防护措施。

关 键 词: 洋口港; LNG 码头栈桥; 桩基局部冲刷; 潮流

中图分类号: U442.3⁺2; U656.1⁺16 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2012)05-0018-06

洋口港 LNG(Liquefied Natural Gas)接收站位于如东岸外辐射状沙脊中南部的西太阳沙人工岛东北部, 利用人工岛北侧自然深槽和烂沙洋北水道潮流通道的作为码头港池和进港航道。码头与人工岛之间通过栈桥相连, 栈桥沿程布设桥墩较多。LNG 码头和栈桥工程所处海域动力条件复杂, 海床泥沙以粉沙为主, 泥沙活动性强。地形资料对比分析显示, 自栈桥工程施工开建至 2010 年 11 月的 1 年多时间内, 栈桥沿程各桩基均出现不同程度的冲刷, 冲刷坑发展迅速。因此, 有必要结合海域水沙动力环境, 针对工程建设所引起的海床冲刷情况, 分析桩基局部冲刷坑的形成、发展规律和原因, 并提出工程应急防护措施^[1]。

1 自然条件

1.1 潮汐与潮流

工程区位于西太阳沙海域, 潮汐环境受南黄海旋转潮波系统控制。该潮波系统由东海前进潮波及其部分经由山东半岛反射潮波汇合形成, 两大潮波系统的辐合使得辐射沙脊海域潮差增大, 并形成辐射状的潮流流场。1996 年 10 月至 1997 年 10 月实测资料^[1]统计显示, 该海域年最高高潮位 8.42 m(理论基面, 下同), 年最低低潮位 0.21 m, 最大潮差 8.08 m; 年平均高潮位 6.07 m, 年平均低潮位 1.46 m, 平均潮差 4.61 m。

西太阳沙海域潮流属于规则半日潮流, 潮流运动受水道沙洲地形影响, 外海区域呈旋转流性质, 水道内则呈往复流特征, 涨、落潮流方向与水道深槽走向一致。潮流流速强弱分布稳定, 潮流通道内流速大于通道边缘流速。2003 年 4 月^[2]和 2005 年 5 月^[3]实测资料表明, 工程区所在的西太阳沙东北侧烂沙洋北水道-10 m 以深的深槽呈落潮优势流, 大潮落潮平均流速为 1.11~1.15 m/s, 为涨潮平均流速的 1.2~1.4 倍; -7 m 以浅近岸区潮流为涨潮优势流, 涨潮平均流速为 0.81~0.93 m/s, 为落潮流的 1.19~1.34 倍; -7~-10 m 海域涨、落潮流流速相当, 大潮平均流速约 1.0 m/s。

1.2 波 浪

如东岸外海域主要受季风影响, 波浪也以风浪为主。工程区西向和南向离陆地较近, 风浪作用较小; 北向

收稿日期: 2012-01-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41006048); 南京水利科学研究院研究生基金资助项目(LB21101)

作者简介: 曾成杰(1984-), 男, 湖南沅江人, 博士研究生, 主要从事港口海岸泥沙的研究工作。E-mail: zengcj02@163.com

和东向面朝外海,但北有鳊鱼沙、茄儿杆子、茄儿叶子,东有太阳沙、大洪埂子等沙体的掩护,外海波浪传播至本海域后强度较小. 海域常浪向为 N 向,其频率为 19.6%;强浪向为 N 和 NNE 向. 据资料统计^[1]表明,有效波高小于 0.3 m,平均周期 4.0~4.9 s 的波浪频率占 40%;有效波高 0.4~1.1 m,平均周期 4.0~4.9 s 的波浪频率为 32%.

1.3 泥 沙

西太阳沙海域水体含沙量不大,实测的大、中、小潮垂线平均含沙量分别为 0.19、0.18 和 0.10 kg/m³. 悬沙平均中值粒径 0.02 mm 左右.

海域海床沉积物主要以沙质粉沙、粉沙质沙和细沙等组成. 底质中值粒径介于 0.007~0.258 mm 之间. 栈桥沿程海床粉沙含量较大,具有易起动、易沉降、活动性强的运动特性. 泥沙中值粒径约为 0.11 mm,其中深水区海床泥沙较细,中值粒径小于 0.1 mm;近岸区大于 0.1 mm^[1].

根据窦国仁泥沙起动公式,工程区泥沙从近岸到-16 m 水深的起动流速约为 0.45~0.60 m/s,说明大潮时栈桥沿程泥沙在涨、落潮流作用下均可以起动. 刘家驹^[4]通过研究指出,泥沙近岸区粒径为 0.1~0.2 mm 的细粉沙在波浪作用下最易起动,深水区小于该粒径泥沙由于颗粒间粘结力增强而不易起动. 泥沙运动特性水槽试验也表明,平常天气条件下,波浪仅能起动-1 m 以浅的海床泥沙. 表明该海域岸坡泥沙运动受潮流影响更大.

2 工程布置与结构型式

洋口港 LNG 项目接收站位于西太阳沙人工岛东北侧,与人工岛之间通过栈桥相连,栈桥全长 1 970 m,从近岸一直延伸至-15.4 m 水深. 根据 LNG 运营需要,栈桥沿程共布置有 10 个补偿器墩和 9 个固定墩(见图 1).

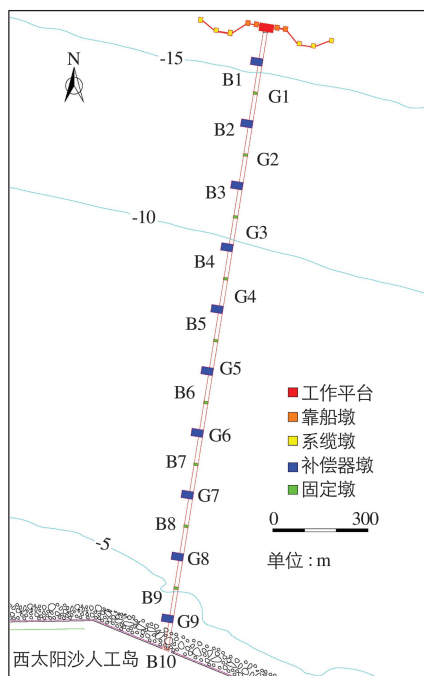


图1 LNG 接收站码头及栈桥平面布置

Fig. 1 Layout plan of LNG station trestle

补偿器墩的间距为 196.8 m,2 个补偿器墩之间布置 1 个固定墩. 栈桥墩结构为墩台式,采用钢管桩及现浇钢筋混凝土墩台结构. 补偿器墩平台平面尺寸为 37.5 m×24 m,平台下方倾斜布置有 4 排共 24 根管径为 1.2 m 的钢管桩,相邻排管桩间隔 7 m,采用斜桩型式布置. 固定墩平面尺寸为 14.5 m×8 m,每个固定墩布置有 8 根钢管桩(见图 2).

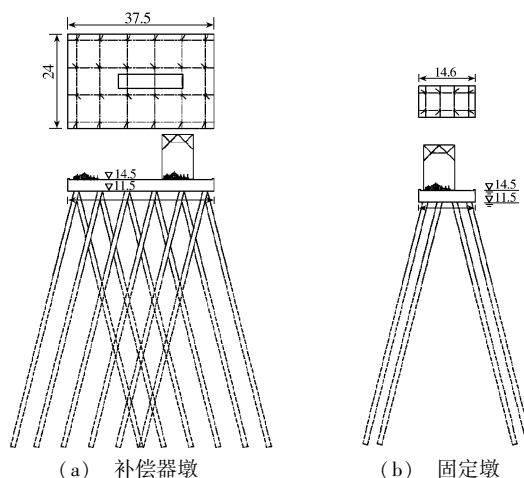


图2 桩基桥墩结构型式(单位: m)

Fig. 2 Structure design of piers (unit: m)

3 局部冲刷状况及原因分析

局部冲刷是桩基周边床面发生冲蚀的普遍现象,研究^[5-9]认为,水流中桥墩建筑所引起的墩前向下水流

冲击、墩柱两侧马蹄形漩涡和过水断面束窄引起的流线压缩是桥墩周边局部冲刷的主要因素. 对于受波浪和潮流共同作用的桩基, 也有研究^[10-13]表明, 当水流较强时, 波浪共同作用产生的局部冲刷与单纯水流作用的相当, 在水流较弱而波浪较强时则波浪作用有一定的影响.

为及时掌握栈桥建设引起的泥沙运动和海床变化, 2008 年 4 月(工程建设前)、2009 年 4 月(工程建设期间)、2010 年 5 月、7 月、11 月(工程建设后)共进行了 5 次水下地形监测. 其中 2010 年 7 月测量为多波束扫测 1 : 500 地形图, 其结果能较好地测量桩基桩群周边及内部的地形变化情况和最大冲深发展. 其余 4 次为 1 : 2 000 水下地形测量, 对桩基外围海床冲淤变化有较好反映, 但其不足是桩群内部测点较少. 对比历次地形资料可知, LNG 码头栈桥施工建设以来沿程桩基周边均产生不同程度的冲刷, 不同时期桩基局部冲刷幅度 2 m 的范围及冲刷深度如表 1 所示.

表 1 栈桥沿程桩基不同时段冲刷深度达 2 m 的范围及最大冲深

Tab. 1 Areas with depth exceeding 2 m and the max scour depth around piers in different time

墩 号	水深/ m	2009 年 4 月 (1 : 2 000)		2010 年 5 月 (1 : 2 000)		2010 年 11 月 (1 : 2 000)		2010 年 7 月 (1 : 500)		
		冲刷范围/	桩基外缘	冲刷范围/	桩基外缘	冲刷范围/	桩基外缘	冲刷范围/	桩基外缘	
		m ²	冲深/ m	m ²	冲深/ m	m ²	冲深/ m	m ²	冲深/ m	
补 偿 器 墩	B1	15.4	0	0.0	6 160	3.1	18 500	6.2	16 300	7.9
	B2	13.9	0	-0.2	3 110	2.9	6 710	3.6	4 870	6.0
	B3	12.0	0	0.0	2 940	2.2	6 430	2.2	5 440	6.3
	B4	9.6	0	0.1	5 000	3.0	5 900	3.2	5 400	5.9
	B5	7.0	0	0.0	2 480	2.2	2 420	2.3	2 680	5.3
	B6	6.2	0	0.3	3 050	2.1	3 160	2.6	3 210	4.6
	B7	6.8	0	0.4	0	1.2	0	1.2	1 750	3.6
	B8	6.2	0	0.9	3 080	2.8	7 280	2.7	5 650	3.2
	B9	5.5	0	1.4	3 380	2.9	3 730	3.5	7 310	3.0
	B10	3.0	0	0.5	0	0.6	0	1.0	0	2.0
固 定 墩	G1	14.8	0	-0.3	780	2.2	3 300	3.3	1 820	5.0
	G2	13.0	0	0.0	910	2.9	2 430	3.3	1 810	4.2
	G3	10.9	0	-0.2	980	2.2	2 590	2.1	1 230	4.2
	G4	8.4	0	-0.2	480	2.1	600	2.0	660	3.8
	G5	6.3	0	0.2	360	2.0	1 280	2.7	970	3.8
	G6	6.3	0	0.4	1 780	2.5	2 680	2.7	2 080	3.7
	G7	6.5	0	0.4	890	2.5	2 490	2.5	2 070	4.5
	G8	6.0	0	1.2	3 610	2.4	3 820	2.4	3 630	3.0
	G9	4.5	0	1.1	1 420	2.0	1 280	2.0	1 380	2.5

根据监测资料对比分析, 栈桥沿程桩基冲刷呈如下特点:

(1) 各相邻墩台桩基冲深 2 m 的冲刷坑相距 50 ~ 70 m, 冲刷坑相对独立, 表明该冲刷属各墩台桩基局部水流改变引起的局部冲刷, 而非工程区水下岸坡整体刷深.

(2) 桩基局部冲刷的动力因素主要为潮流. 栈桥沿程冲刷坑具有涨、落潮双向水流冲刷的形态特征, 桩基两侧均有冲刷坑形成.

(3) 各墩台桩基冲刷坑形态取决于所处海域的涨、落潮流相对强弱. 浅水区涨潮流相对较强, 冲刷坑形态顺应涨潮流方向, 涨潮迎水面侧冲刷范围较小, 另一侧受尾流漩涡的影响, 冲刷坑呈狭长状(图 3(a)); 深水区落潮流相对较强, 冲刷坑形态顺应落潮方向, 冲刷坑形态与浅水区正好相反(图 3(b)); 栈桥中部涨、落潮流强度相当, 冲刷坑形态也相对对称(图 3(c)). 栈桥沿程 -10 m 以深区域的冲刷以落潮流冲刷为主, -7 m 以浅区域的冲刷以涨潮流冲刷为主(图 4).

(4) 各墩台桩基的局部冲刷范围、强度与潮流流速大小、墩台桩群规模密切相关. 栈桥沿程潮流流速随水深增大而增强, 局部冲刷的深度相应增大. 在水深相近、潮流动力相似的区域, 补偿器墩桩群规模大于固定

墩,局部冲刷幅度和范围也明显大于固定墩。

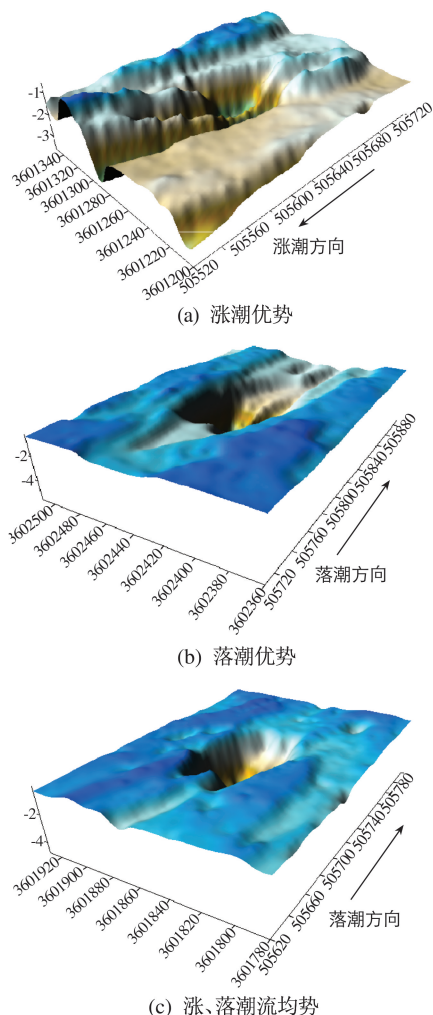


图3 不同涨、落潮流时冲刷状况

Fig.3 Local scour by different currents

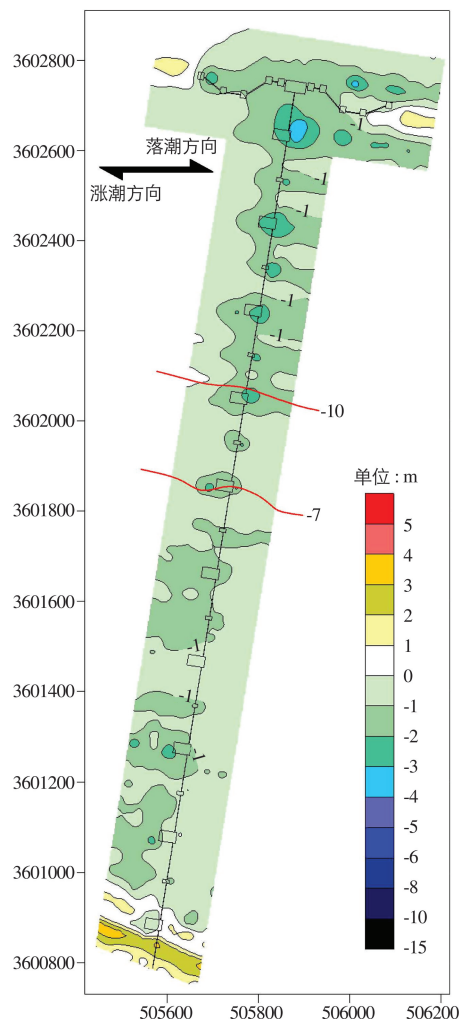


图4 栈桥沿程桩基冲刷状况(2010年5月, 1:2 000)

Fig.4 Local scour around the piers along the trestle

(5)冲刷坑的形态与墩台桩群的分布有关. 根据2010年7月多波束扫测结果显示,固定墩尺度较小,布置的桩群较少且分布均匀,其冲刷坑在桩基附近无明显差异,呈整体冲刷坑形态. 而补偿器墩因桩基较多,桩群两侧的马蹄形漩涡所引起的紊动较强,外侧桩群局部冲刷强度较大;桩群内部水流动力较两侧要弱,内部中心区的冲刷幅度较外侧小,因此在冲刷坑内部外侧桩基附近产生2个次级冲刷坑。

4 局部冲刷发展与防护

J. Chabter 等^[14]根据大量试验研究得到清水和动床冲刷条件下冲刷坑形态与深度随时间的发展过程(图5),研究表明,在桩基局部冲刷过程中,冲刷初期冲坑迅速发展,在较短的时间内冲刷坑规模和冲深都将达到较大值,之后则处于动态平衡的过程。

从地形资料对比分析可知,栈桥沿程不同水深位置桩基局部冲刷幅度超过1 m的冲坑在2010年5月左右即基本达到稳定,冲刷1 m范围处于动态平衡的状态(图6). 局部冲刷超过2 m的冲坑

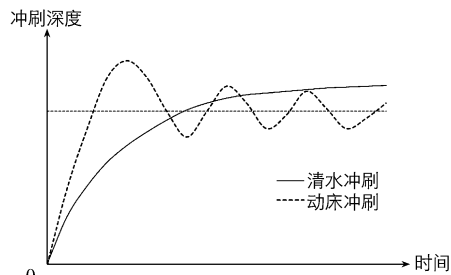


图5 桥墩局部冲刷随时间发展过程

Fig.5 Time-dependent local scour depth

范围在浅水区附近基本达到稳定,深水区桩基附近有所扩大,但2011年7—11月较同年5—7月有发展放缓的趋势.表明潮流作用下桩基局部冲刷在形态和范围早期发展迅速,但在平面位置基本稳定的基础上,冲坑在深度上继续发展.

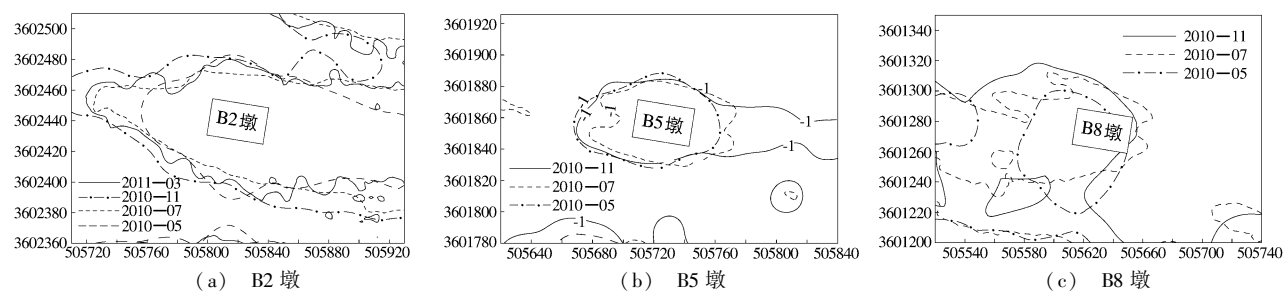


图6 冲刷幅度1 m的冲坑范围

Fig. 6 Local scour pit having depth exceeding 1 m

为避免局部冲刷深度进一步增大影响桩基安全,需对桩基局部进行护底防护.鉴于各冲刷坑相互独立的实际情况,无需对栈桥沿程进行整体防护,只需开展单独防护措施.在冲深1 m范围已基本稳定、冲深2 m范围发展趋缓形势下,以冲深2 m范围为核心区域进行防护能有效控制冲刷深度增大的同时并不会引起防护周边新的冲刷.

5 结 语

洋口港 LNG 桩基附近产生的冲刷并非海床的整体冲刷,而是桩群附近水流条件改变所引起的局部冲刷.桩基局部冲刷的控制性动力为潮流,冲刷坑形态呈双向水流冲刷形式,其分布与涨落潮流相对强弱密切相关,-7 m以浅海域冲刷坑呈涨潮优势流冲刷形式,-10 m以深海域冲刷坑表现为落潮优势流冲刷.冲刷坑形态、深度与桩基尺度和布置有关,冲刷范围和深度随水流强度增大而增大.水深和水流条件相似情况下,补偿器墩较固定墩冲刷坑范围和深度更大,补偿器墩桩群外缘冲刷深度较内部大.

潮流作用下的粉沙质海床建筑物局部冲刷坑形态发展迅速,LNG接收站桩基局部冲刷至2010年5月时冲深1 m的范围基本稳定.2010年7—11月冲深2 m区域发展速度较前期亦有所放慢,但未防护情况下冲刷深度仍在增大.对于桩基局部的应急防护,建议采取各冲刷坑单独防护和以冲深2 m范围为核心防护区域的防护思路.

参 考 文 献:

- [1] 陆培东. 江苏 LNG 接收站配套码头及栈桥桩基冲刷与防护物理模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2011. (LU Pei-dong. Physical modeling research on local scour and protection around the piers of jetty and trestle of Jiangsu LNG receiving station[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2011. (in Chinese))
- [2] 长江水利委员会长江口水文水资源勘测局. 江苏省如东县人工岛工程海流、泥沙、底质观测技术成果报告[R]. 上海: 长江水利委员会长江口水文水资源勘测局, 2003. (Yangtze Estuary Hydrological and Water Resources Survey Sub-Bureau, Changjiang Water Resources Commission. The survey achievement of ocean current, sediment and bed load around the artificial island in Rudong, Jiangsu[R]. Shanghai: Yangtze Estuary Hydrological and Water Resources Survey Sub-Bureau, Changjiang Water Resources Commission, 2003. (in Chinese))
- [3] 长江水利委员会长江口水文水资源勘测局. 江苏省南通港洋口港区海域海流、泥沙、底质观测技术成果报告[R]. 上海: 长江水利委员会长江口水文水资源勘测局, 2005. (Yangtze Estuary Hydrological and Water Resources Survey Sub-Bureau, Changjiang Water Resources Commission. The survey achievement of ocean current, sediment and bed load in Yangkou port area of Nantong, Jiangsu[R]. Shanghai: Yangtze Estuary Hydrological and Water Resources Survey Sub-Bureau, Changjiang Water Resources Commission, 2005. (in Chinese))

- Resources Commission, 2005. (in Chinese))
- [4] 刘家驹. 海岸泥沙运动研究与应用[M]. 北京: 海洋出版社, 2009: 61-63. (LIU Jia-ju. Research and application on coastal sediment[M]. Beijing: Ocean Press, 2009: 61-63. (in Chinese))
- [5] MELVILLE B W, COLEMAN S E. Bridge scour[M]. USA: Water Resource Publication, 1975: 9-10.
- [6] RAUDIKIVI A J, ETTEMA R. Clear water scour at cylindrical piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1983, 109(3): 338-350
- [7] 赵凯, 唐存本, 张幸农. 桥墩冲刷研究综述[C]//周孝德. 第七届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集. 西安: 陕西科学技术出版社, 2008. (ZHAO Kai, TANG Cun-ben, ZHANG Xin-nong. Review of research on scour around pier[C]//ZHOU Xiao-de. Symposium of 7th National Sediment Basic Theoretical Research Colloquium. Xi'an: Shaanxi Scientific and Technological Press, 2008. (in Chinese))
- [8] 吴雪茹. 桥墩一般冲刷计算研究[J]. 水运工程, 2007(5): 27-30. (WU Xue-ru. Calculation of bridge pier's general erosion [J]. Port and Waterway Engineering, 2007(5): 27-30. (in Chinese))
- [9] 薛小华. 桥墩冲刷的试验研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005. (XUE Xiao-hua. Experiment research on local scour around piers[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese))
- [10] 陈国平, 左其华, 黄海龙. 波浪作用下桩柱周围局部冲刷研究[J]. 海洋工程, 2000, 18(4): 21-26. (CHEN Guo-ping, ZUO Qi-hua, HUANG Hai-long. Local scour around cylinder under wave action[J]. Ocean Engineering, 2000, 18(4): 21-26. (in Chinese))
- [11] 曲立清, 周益人, 杨进先. 波流共同作用下大型桥墩周围局部冲刷实验研究[J]. 水运工程, 2006(4): 23-27. (QU Li-qing, ZHOU Yi-ren, YANG Jin-xian. Experimental study on local scour around bridge piers by wave and current[J]. Port and Waterway Engineering, 2006(4): 23-27. (in Chinese))
- [12] 董斌, 边淑华, 刘建强. 往复海流作用下桩基局部冲刷及海底沉积物粒度变化[J]. 海岸工程, 2009, 28(6): 1-8. (DONG Bin, BIAN Shu-hua, LIU Jian-qiang. Scour and sediment particle size change around pile base acted by rectilinear current[J]. Coastal Engineering, 2009, 28(6): 1-8. (in Chinese))
- [13] 高正荣, 黄建维, 卢中一. 长江河口跨江大桥桥墩局部冲刷及防护研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2005. (GAO Zheng-rong, HUANG Jian-wei, LU Zhong-yi. Research on local scour and protection around piers of bridges over the Yangtze River estuary[M]. Beijing: Ocean Press, 2005. (in Chinese))
- [14] CHABTER J, ENGELDINGER P. Etude des Affouillement autour des Piles des Ponts, Laboratoire National d'Hydraulic Chatou, France, 1956. (in French))

Research on local scour around the trestle piers of LNG station at Yangkou port

ZENG Cheng-jie, LU Pei-dong, WANG Yan-hong, CHEN Ke-feng
(*Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: The Yangkou liquefied natural gas (LNG) station is located on the northeastern side of Xitaiyangsha artificial island. With complicated dynamic condition and active sediment, the local scour around the piers has been found after completion. The evolution process is discussed, comparing with the topographical change along the trestle. Considering the hydrodynamic and sediment conditions, the distribution of local scour and the cause are analyzed in the study. The research results show that: (1) the distribution of scour pits is related to the dominant current; and (2) the extent and depth of scour is controlled by the current speed and the scale of piers. After speedy development in short time, the distribution would be stabilized, but the depth of scour pits would be increased. It is necessary to take protection measures around piers in emergency situation.

Key words: Yangkou port; LNG trestle; local scour; tidal current