



# 软土夹层地基上码头的整体稳定性分析\*

李 醒, 王 刚, 刘淑娟

(中国水产科学研究院渔业工程研究所, 北京 100125)

**摘要:** 码头整体稳定性决定码头工程的成败, 有软土夹层的地基对码头整体稳定性的影响不可忽视。以江苏吕四渔港为例, 分析软土夹层对码头整体稳定性的影响, 总结规律并进行试算, 给出了参考指标, 并对不满足稳定性要求的地基提出处理方案, 对类似地质情况下码头设计与施工有重要的借鉴意义。

**关键词:** 软土夹层; 整体稳定性; 影响分析

中图分类号: TU 447

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)09-0123-06

## Port stability analysis on foundation contained soft stratum

LI Xing, WANG Gang, LIU Shu-juan

(Fishery Engineering Research Institute of Chinese Academy of Fishery Sciences, Beijing 100125, China)

**Abstract:** The overall stability of a port determines the project's success or failure. The effect of the foundation with soft soil interlayer on the port's stability can by no means be ignored. Taking Lvsu fishery port in Jiangsu as an example, the essay analyzes the impact of the soft soil interlayer on the overall stability of a port, sums up relevant rules and conducts tentative calculations with reference indexes offered. Moreover, it proposes solutions to the cases where the foundation does not meet the stability requirements, which serves as reference to the port's design and construction in similar geologic situations.

**Key words:** soft soil layer; stability; influence analysis

中国渔港建设位置的工程地质常遇到含有软土夹层的一些地基, 软土夹层的物理力学强度低、压缩性大、抗震性差。当软土夹层位置距离码头基础较近时, 码头整体稳定性的圆弧滑动面通过此夹层, 故码头整体稳定性受软土夹层的影响较大。

国内围绕软土夹层地基上建筑物的整体稳定性分析问题进行了一些研究, 现阶段的研究多为圆弧滑动方法探讨<sup>[1-2]</sup>, 行业规范的经验公式方便实用且能够满足工程要求<sup>[3]</sup>。本文根据规范的公式, 选取吕四中心渔港为实例<sup>[4]</sup>, 讨论软土夹层的位置及厚度对码头整体稳定性影响情况。

本文采用单因素影响分析的方法, 总结出软土夹层对码头整体稳定性影响的规律并通过试算得出实用结论, 当整体稳定性不满足时, 提出对其进行加固处理的方法, 确保建筑物的安全性和稳定性。经过工程现场施工的观测, 本文的实例研究是可行和符合实际的, 在类似地质情况下码头设计与施工有重要的借鉴意义。

## 1 吕四渔港工程背景

### 1.1 工程概况

吕四中心渔港地处苏北平原的东南犄角之端, 紧靠著名的中国四大渔场之一的吕四渔场,

收稿日期: 2013-03-04

\*基金项目: 中国水产科学研究院院本级中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2013C009)

作者简介: 李醒(1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事渔业工程研究与咨询。

为全国率先建设的六大国家级中心渔港之一。此次渔港的建设为在原有渔港的基础上进行扩建，将把吕四中心渔港建成我国最大的渔港。吕四中心渔港位于船闸内，渔船作业和停泊基本不受外海波浪影响。

吕四中心渔港平面布置方案为：矩形大港池内设“三岛方案”，形成水域、岸线和小岛陆地，为保证港池水域的水体流动性，小岛与陆地距离70 m，可由引桥连接。平面布置及钻孔位置见图1。

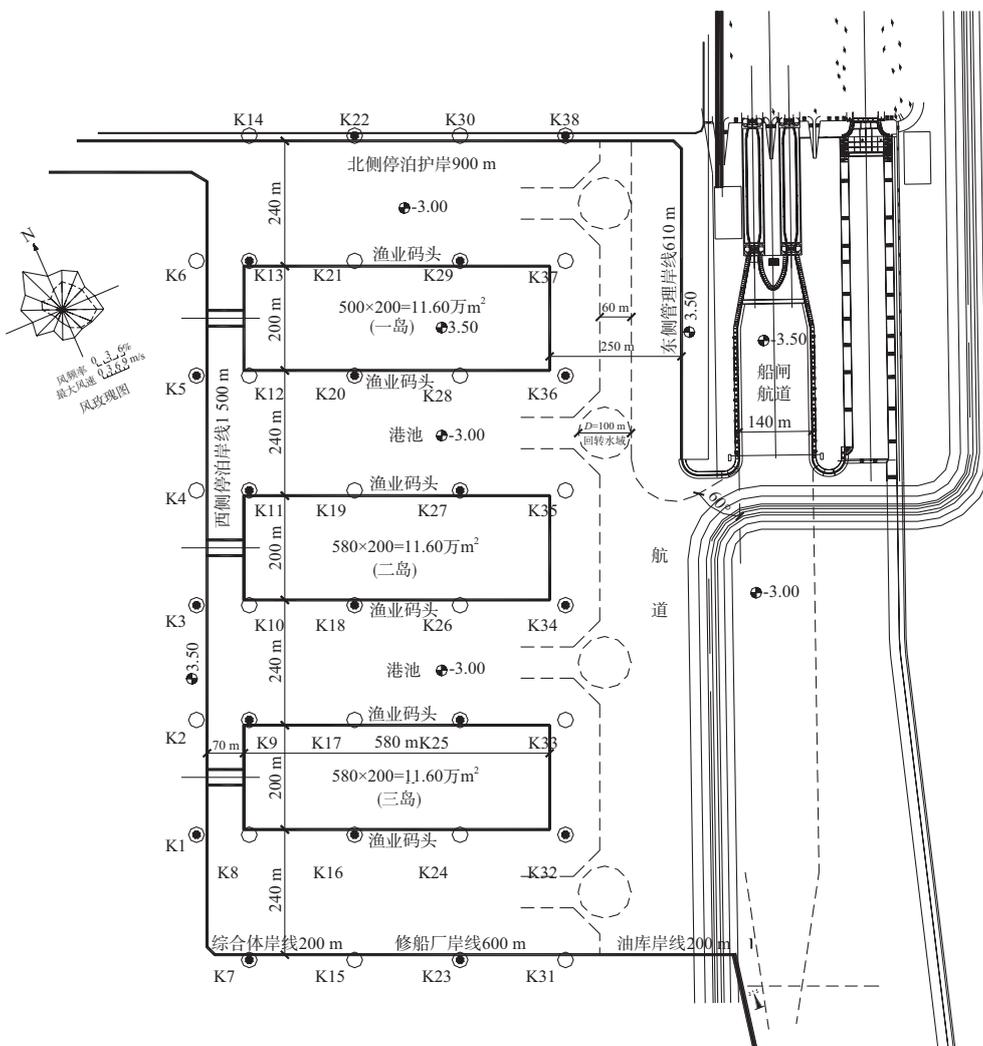


图1 江苏吕四中心渔港平面布置及钻孔位置

1.2 岩土物理力学性质指标

根据工程地质勘察报告<sup>[5]</sup>，拟建工区海域勘察深

度内岩土自上而下可分为7层，各土层的地基土主要物理力学性质指标见表1，各土层的地质剖面见图2。

表1 地基土主要物理力学性质

土层名称	压缩系数 $\alpha_{1-2}/\text{MPa}^{-1}$	压缩模量 $E_{s1-2}/\text{MPa}$	直剪快剪		固结快剪		容许承载力 $f/\text{kPa}$
			黏聚力 $C_q/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi_q/(\text{°})$	黏聚力 $C_{cq}/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi_{cq}/(\text{°})$	
粉土②	0.37	5.31	4.03	18.90	4.12	20.43	90
粉土夹粉质黏土③	0.31	6.08	2.64	21.94	1.98	21.31	120
淤泥质粉质黏土④	0.63	3.34	8.50	4.50	10.53	10.57	70
粉质黏土夹粉土⑤	0.43	4.66	10.83	14.22	12.02	15.04	110
淤泥质粉质黏土⑥	0.55	3.74	10.39	12.32	11.29	12.33	90
粉土夹粉砂⑦	0.29	6.62	2.37	23.58	2.87	23.81	130

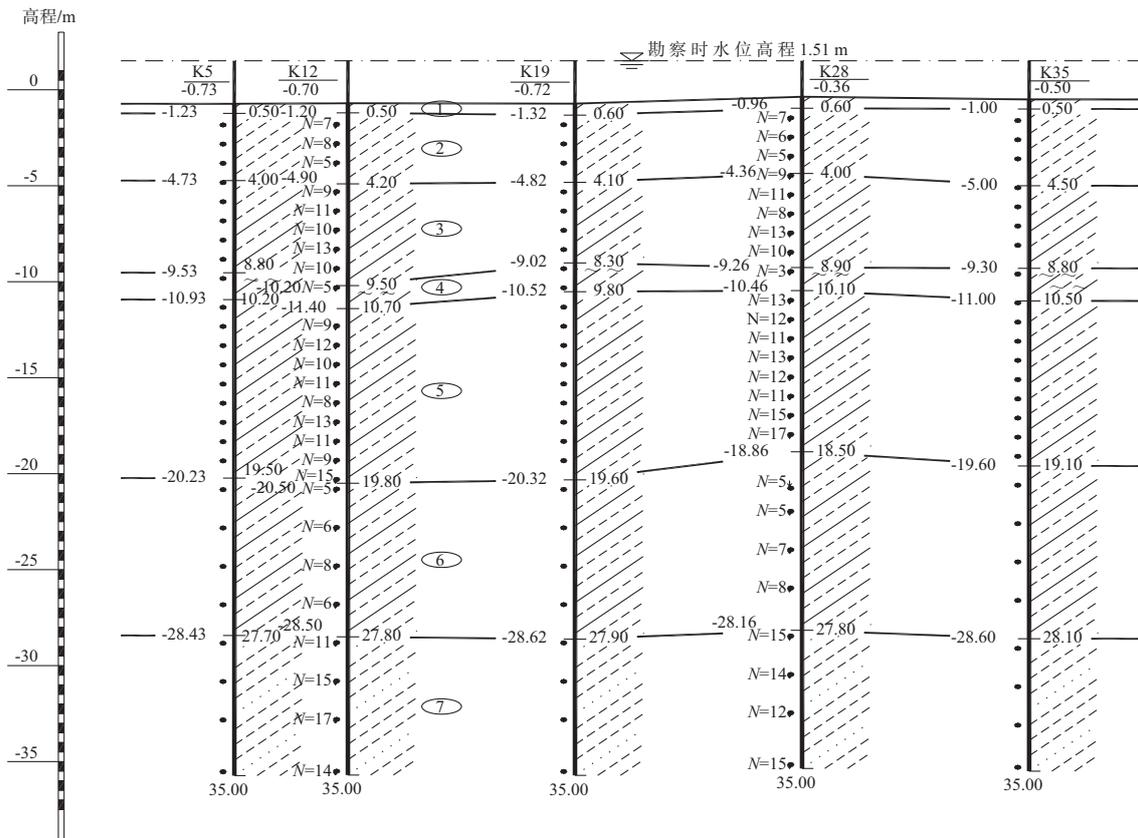


图2 工程地质剖面

### 1.3 码头断面选择

通过分析地质勘察结果, 并参考周边地区码头工程的结构选型和施工经验, 拟建码头采用重力式结构。港池开挖底高程-3.0 m, 基础底高程-5.0 m, 落于第③层土上。第③层粉土夹粉质黏土分布较为均匀, 中压缩性, 承载力可作为重力式码头基础持力层。第④层淤泥质粉质黏土, 流塑, 高压缩性, 低强度, 工程地质性能较差, 为本工程的主要不良地质现象。第⑤层粉质黏土夹粉土, 中压缩性, 承载力高。

由此可见, 第④层为软土夹层, 距离基础底面4 m左右。如果处理则增加了不必要的工程造价; 如果不处理, 码头整体稳定性的圆弧滑动面通过此夹层, 整体稳定性不一定满足。要注意观察圆弧滑动面, 必要时提出相应的基础施工方案, 采取可靠、有效的工程措施。

### 1.4 基床应力和沉降

基床底面最大应力为111 kPa, 小于第③层土容许承载力的120 kPa, 持力层的承载力满足要求; 软弱下卧层的承载力计算也满足要求, 故地

基承载力满足要求。

地基最终沉降量计算最大沉降量为14.8 cm, 第④层的沉降量为2.7 cm, 占总沉降的18%。由此可见, 软土层导致的基础沉降相对于其厚度来说较大, 但由于软土层厚度较薄, 软土层导致的基础沉降占总沉降的比重不大, 且总沉降满足规范<sup>[6]</sup>要求。

故地基承载力和沉降不是影响该码头建设的关键。

## 2 整体稳定性计算

### 2.1 计算公式选取

按照《港口工程地基规范》中第6.3.2条的规定: 土坡和地基的稳定性验算, 其危险滑动面均应满足以下极限状态设计表达式:

$$\gamma_0' M_{sd} \leq M_{Rk} / \gamma_R \quad (1)$$

式中:  $\gamma_0'$ 为重要性系数, 安全等级为一级、二级、三级的建筑物, 分别取1.1, 1.0, 1.0;  $M_{sd}$ 为作用于危险滑动面上滑动力矩的设计值;  $\gamma_R$ 为抗力分项系数;  $M_{Rk}$ 为危险滑动面上抗滑力矩的标准值。

## 2.2 滑动面分析

以钻孔K19为例，假设多个滑移面进行稳定性分析。钻孔K19土层分布情况见图2。码头整体稳定性计算采用的指标见表1，持久状况用固结快剪，短暂状况用直剪快剪，码头整体稳定性计算结果仅列出控制系数（表2），并给出控制滑移面示意图（图3）。

表2 钻孔K19不同滑移面整体稳定性计算

土层名称	土层底高程/m	假设滑移面底高程/m	整体稳定性系数
②	-4.82	-8.0	1.14
③	-9.02	-9.0	1.11
④	-10.52	-10.0	1.08
⑤	-20.52	-11.0	1.11
⑥	-28.62	-12.0	1.12
⑦	-35.00	-13.0	1.28

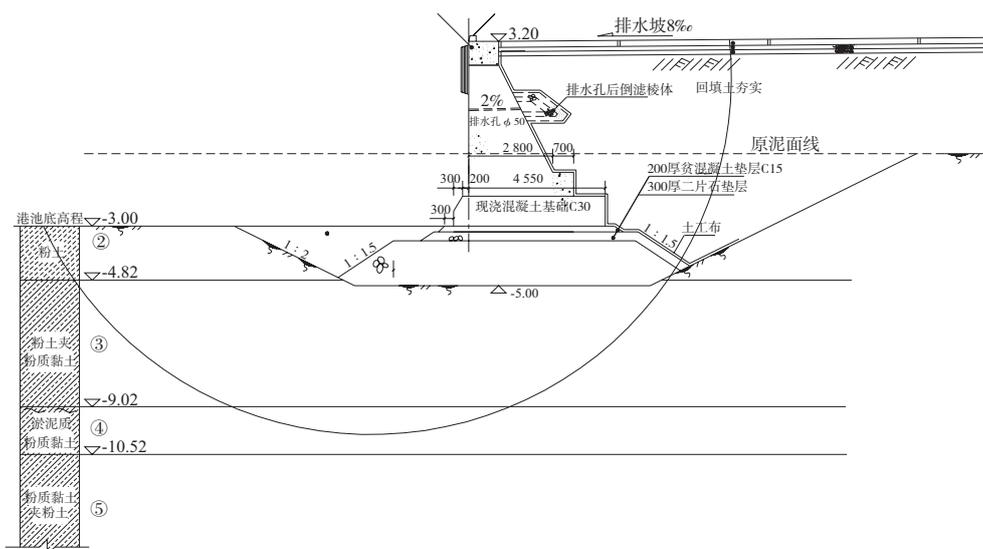


图3 控制滑移面

由表2和图3可见，码头整体稳定性的控制滑移面底高程位于第④层的淤泥质粉质黏土层，即为软土层，故软土夹层为码头整体稳定性的控制面。

## 2.3 计算结果及分析

选取代表性钻孔计算码头整体稳定性，计算结果见表3。

表3 不同钻孔整体稳定性计算

钻孔	软土层顶高程/m	软土层底高程/m	厚度/m	整体稳定性系数
K6	-9.60	-11.30	1.70	1.16
K22	-9.60	-11.20	1.60	1.17
K19	-9.02	-10.52	1.50	1.08
K29	-9.46	-10.96	1.50	1.12
K28	-9.26	-10.46	1.20	1.14
K35	-9.30	-11.00	1.70	1.11

由表3可见：1) 比较钻孔K6与钻孔K22：两者软土层顶高程相同，厚度不同时，厚度厚者整体稳定性差。2) 比较钻孔K19与钻孔K29：两者厚度相同，软土层顶高程不同时，顶高程高者

整体稳定性差。3) 比较钻孔K19与钻孔K28：软土层顶高程高、厚度厚者比软土层顶高程低、厚度薄者整体稳定性差。4) 比较钻孔K35与钻孔K28：软土层顶高程低、厚度厚者比软土层顶高程高、厚度薄者整体稳定性差。5) 比较钻孔K22与钻孔K28：软土层顶高程低、厚度厚者比软土层顶高程高、厚度薄者整体稳定性好。

故而，软土层顶高程低、厚度厚者与软土层顶高程高、厚度薄者情况下的整体稳定下由软土层顶高程和厚度两个因素决定。

影响码头的整体稳定性因素为圆弧滑动面底端所在的软土层顶高程及厚度，规律为，软土层浅、厚度深者对码头整体稳定性影响不利。

## 2.4 试算

选取实际钻孔数据范围内的软土层的不同顶高程和厚度进行试算，试算出不同软土层厚度满足码头整体稳定性的软土层顶高程的最高值。采用的计算程序设定的安全系数大于1.1为稳定，不

断降低软土层的顶高程,当结果大于1.1时即可停止试算,根据上一节的规律,当软土层厚度增加时,同样的软土层顶高程,整体稳定性是变差的,故在软土层厚度增加时,不必从初始的软土层顶高程算起,只要从上一厚度整体稳定性满足的顶高程算起即可,试算结果见表4。

表4 码头整体稳定性试算

试算次数	软土层厚度/m	软土层顶高程/m	整体稳定性系数
1		-8.50	1.04
2	1.0	-9.20	1.12
3	1.20	-9.20	1.12
4	1.40	-9.20	1.09
5	1.40	-9.30	1.14
6	1.60	-9.30	1.14
7	1.80	-9.30	1.11

根据此表,结合2.3的规律,不必计算每个钻孔的码头整体稳定性,即可根据钻孔的软土夹层顶高程和厚度判断码头整体稳定性,亦可作为验证实际钻孔的整体稳定性的计算结果的检验指标,从而把握码头的整体稳定性情况。

利用表3中的实际钻孔进行验证。以钻孔K6为例,其软土层厚度为1.7 m,软土层顶高程

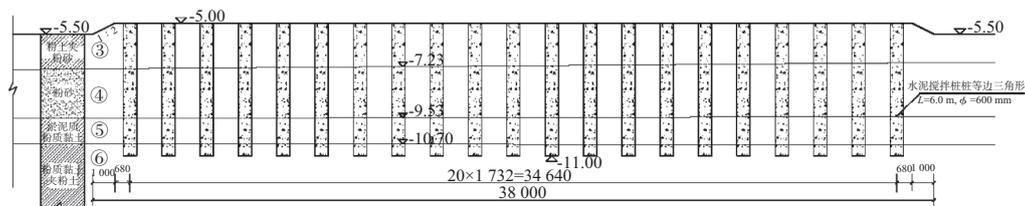
为-9.60 m,查表4中的试算次数7可得,钻孔K6的软土层厚度薄于试算次数7,软土层顶高程低于试算次数7,根据2.3中的规律3)可以判断,钻孔K6的整体稳定性要好于试算次数7,整体稳定性满足要求。查表3得,钻孔K6的整体稳定性系数实际计算结果为1.16,大于试算次数7的整体稳定性系数的1.11,故判断准确。

可研阶段的地质勘察钻孔共38个,设计阶段钻孔将增加一倍以上,利用以上的试算方法,只需要7次计算即可掌握软土夹层对码头整体稳定性的规律。利用此方法不仅可以减少设计工作的工程计算量,并且可以更好地保障计算结果的正确性。此方法可以在类似地质情况下的码头设计中推广应用。

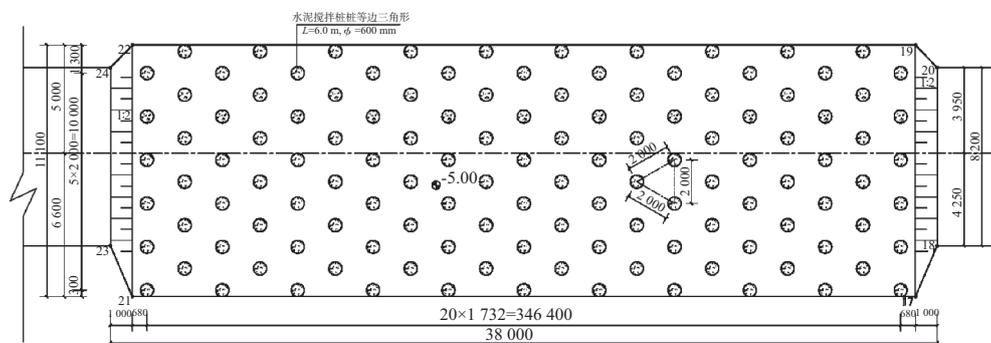
### 3 地基处理

#### 3.1 处理方式

码头整体稳定性计算不满足要求时,应进行地基处理,地基处理方案采用当地习惯做法:水泥搅拌桩加固地基,水泥桩长5 m,直径600 mm,梅花型布置间距2 m。布置形式见图3。



a) A-A (1:100)



b) 平面图 (1:100)

图3 地基处理布置

#### 3.2 处理后地基

根据有关参考资料和经验<sup>[7]</sup>,软土层经水泥

搅拌法处理后,水泥土内摩擦角约为20°~30°。

采用处理后复合土层的内摩擦角和粘聚力计

算码头的整体稳定性,以钻孔K19为例,处理前码头整体稳定性为1.08,不满足码头整体稳定性要求,处理后码头整体稳定性为1.39,满足码头整体稳定性要求。由此可见,经此法处理地基后,码头整体稳定性得到了极大的提高,此地基处理方式有效可行。

#### 4 结论

1) 软土夹层地基上建设码头时,在其计算整体稳定性分析中,以滑动面通过软土夹层的安全系数最小,故应以滑动面通过软土夹层的情况作为控制条件。

2) 通过分析比较实际钻孔的软土层不同顶高程及厚度与码头整体稳定性系数的关系,总结软土层影响码头整体稳定性的规律为:软土层浅、厚度深者对码头整体稳定性影响不利。

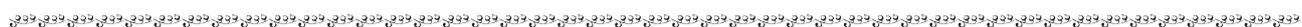
3) 根据上述规律试算出不同软土层厚度满足码头稳定性的软土层顶高程的最高值。利用此方法可以减少设计工作的工程计算量,并且更好地校核了计算结果的正确性。此方法可以在类似地质情况下的码头设计中推广应用。

4) 对不满足整体稳定性的软土夹层地基,采用水泥搅拌桩对较弱地基进行加固,是一种有效、简便、经济的地基加固方法,具有施工简便、快速等优点,能够大大提高渔港工程地基承载力,满足渔港工程建设要求。

#### 参考文献:

[1] 何广纳,肖专文,肖道一. 软土夹层地基上土堤的稳定性分析[J]. 沈阳建筑工程学院学报, 1993(2): 118-125.  
 [2] 殷宗泽,陆保敏. 有软弱夹层土坡的复合滑动条分法[J]. 岩土力学, 1989(4): 75-81.  
 [3] JTS 147-1—2010 港口工程地基规范[S].  
 [4] 大洋碧海渔业规划设计院. 江苏省吕四国家级中心渔港拓展区建设项目可行性研究报告[R]. 北京: 大洋碧海渔业规划设计院, 2011.  
 [5] 恒一岩土工程勘察有限公司. 江苏省南通市吕四中心渔港拓展区工程地质勘察报告[R]. 南通: 恒一岩土工程勘察有限公司, 2010.  
 [6] JTS 167-2—2009 重力式码头设计与施工规范[S].  
 [7] 莫海鸿,杨小平. 基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

( 本文编辑 武亚庆 )



( 上接第102页 )

#### 参考文献:

[1] Webster W C. Ship Handling Simulation Application to Waterway Design[M]. Washington D C: National Academy Press, 1992: 71-79.  
 [2] Bruce L McCartney, Laurie L Ebner, Lyndel Z Hales, et al. Ship Channel Design and Operation [M]. America: Society of Civil Engineers, 2005: 27-31.  
 [3] Guo Weizhi, Liu Jingxian, Liu Zhao, et al. Study on economical channel width for large LNG vessel applied mechanics and materials[C]. Progress in Industrial and Civil Engineering, 2012: 2 324-2 329.  
 [4] JTJ 211—1999 海港总平面设计规范 [S].  
 [5] Bian Xiaoli, Yan Qingxin. Determining the width of channel for large container based on simulation Trials[C]. Wuhan :First International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), 2011: 2 537-2 543.  
 [6] 边晓丽,张庆年. 运用操纵模拟器试验进行超大型船舶航道宽度计算研究[J]. 交通科技, 2012(4): 127-129.

( 本文编辑 武亚庆 )