

Research on Slope Stability of Muddy Submarine Channel

Cunyong Zhang

School of Geomatics and Marine Information, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang Jiangsu
Email: ouczhangcunyong@163.com

Received: May 13th, 2019; accepted: May 28th, 2019; published: Jun. 4th, 2019

Abstract

Based on the field observation, the slope stability of Lianyungang muddy submarine channel was analyzed by the extreme equilibrium method according to its different slopes and sediment of channel with different load. The results show that the sediment of the channel is mostly the underwater delta deposit. The channel slope is basically stable under either static load or dynamic load. There are differences among the safety factors of the channel slope with the maximum safety factor of the outer channel slope, followed by the inter channel slope, and the minimum in Xuwei channel slope.

Keywords

Submarine Channel, Slope, Stability, Lianyungang

淤泥质海底航道边坡稳定性研究

张存勇

淮海工学院, 测绘与海洋信息学院, 江苏 连云港
Email: ouczhangcunyong@163.com

收稿日期: 2019年5月13日; 录用日期: 2019年5月28日; 发布日期: 2019年6月4日

摘要

以连云港淤泥质海底航道为研究对象, 在浅地层剖面测量基础上, 采用极限平衡法分析了不同荷载作用下不同边坡、不同沉积类型航道边坡稳定性。结果表明, 连云港海底航道沉积层主要为水下三角洲沉积物, 航道边坡在静荷载和动荷载作用下基本处于稳定状态, 航道边坡安全系数在空间上具有一定的差异, 外航道外段航道边坡安全系数最大, 外航道内段航道边坡稳定性系数次之, 徐圩航道边坡安全系数最小。

关键词

海底航道, 边坡, 稳定性, 连云港

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

边坡稳定是淤泥质海岸深水航道建设关键问题之一。海水以流、浪、潮等运动形式作用于航道边坡, 受动荷载的强度和周期以及土体自身状态的影响使海底土体强度软化、抗剪强度衰变以及孔隙水压升高极易引起有效应力降低[1], 航道可能产生失稳滑塌, 改变航道几何形状。在航道工程设计中, 一般通过钻探定量评估边坡稳定系数, 由于钻探的有限性、取样测试的困难、边坡的不均匀性以及航道开挖后应力空间变异等导致工程后航道边坡稳定性存在很大的不确定性, 引起了一些研究者的重视。沈达博分析了地层结构效应对航道边坡稳定性的影响[2]。刘涛和陈国平通过断面物理模型试验研究了波流动力作用下泥沙运动对航道边坡稳定性的作用[3]。丁琦等采用波浪数学模型研究了波浪对航道边坡稳定性影响[4]。张建锋等对淤泥质海底航道边坡稳定坡度进行了研究[5]。

连云港港航道是我国开敞型海湾淤泥质浅滩深水航道的典型, 人工开挖航道总长约 70 公里, 其中外航道外段 35.6 公里, 外航道内段 17.3 公里, 徐圩航道 17 公里, 航道呈“人”字形, 其 30 万吨航道是 21 世纪“海上丝绸之路”重要组成部分, 航道需要浚深至-22.5~-23 m, 是迄今为止国内外开挖厚度最大的人工航道, 创造了在淤泥质海岸航道建设中“等级最高、开挖厚度最深、开挖里程最长、疏浚量最多”4 个世界第一, 最大淤泥质开挖厚度 17 米, 最大开挖深度 20 多米, 航道土质可挖性好, 疏浚边坡稳定性差[6]。围绕航道安全运营, 前人对航道淤积研究的较多[7] [8] [9], 对航道边坡稳定性研究的相对较少[3]。本文基于航道浅地层剖面测量, 利用极限平衡法分析航道边坡稳定性, 以期对航道疏浚维护、安全运营以及风险防控提供依据。

2. 材料与方法

2.1. 现场观测

采用德国 SES-2000 参量阵浅地层剖面仪对连云港海底航道海域进行现场走航测量, 航道测线间距 50 m, 浅地层剖面仪发射与接受信号为同一换能器, 通过仪器支架安装在船舷中部一侧, 换能器吃水深度为 1.4 m, GPS 固定在安装杆上, 与换能器的水平距离为 1.5 m, SES-2000 参量阵浅地层剖面仪采用两个 100 kHz 左右的频率作为主频, 利用差频原理形成多个低频, 利用低频的强穿透性来探测海底浅地层剖面。

2.2. 计算方法

采用 Geo-Slope 软件对航道边坡稳定性进行计算分析, 该软件以极限平衡法为基础, 主要包括 Bishop 法、Janbu 法、Morgenstern-Price 法、Spencer 法。Bishop 法根据垂向力的平衡条件以及摩尔-库伦准则建立底面切力、侧面切力和重力之间的关系, 适用圆弧滑裂面。Janbu 法适用于任意滑面并增加了合力作用点, 通过调整作用点计算出的稳定系数精度相对较高。Morgenstern-Price 法和 Spencer 法既考虑了法向

力又考虑了剪切力, Spencer 法是 Morgenstern-Price 法的一个特例, 它假定侧向力的倾角为一常数。这些方法虽然计算不同, 但通过相互作用力之间的函数关系可以联系起来。一些学者通过对比计算得出 Bishop 法、Janbu 法、Morgenstern-Price 法三者算出的安全系数差别不大[10]。本文采用 Janbu 法计算航道边坡的稳定性。由于影响最终效果的主要因素是沉积层的性质和外部动力环境, 根据航道空间位置, 把航道边坡分为外航道外段、外航道内段、徐圩航道三部分, 分别对浅地层剖面测量和航道测量边坡统计分析, 选取典型航道边坡通过滑动面的圆心及半径搜索最危险的滑动面进行边坡稳定系数分析, 根据边坡稳定系数大小判别边坡是否稳定和稳定程度。

3. 结果与分析

3.1. 航道边坡沉积层

航道边坡沉积层性质对边坡的稳定性具有决定性作用, 因此分析其形成地质背景, 充分认识航道边坡沉积层性质及其垂向变化显得尤为重要。连云港海底航道位于江苏废黄河冲积三角洲北侧, 该区域是我国典型的开敞型淤泥质浅水海湾, 是历史上黄河夺淮在苏北入海的 700 年间, 由黄河巨量输沙入海扩散连续淤积而形成的。根据历史资料, 由于黄河泥沙不断向三角洲两侧推进, 云台山以西的海峡不断被淤塞变窄, 在 1851 年左右, 北云台山和北固山与陆地相连[11]。海州湾及其南部沿岸沉积剖面资料表明, 黄河入海口处所堆积的巨大三角洲, 北界可达灌河口以南, 组成三角洲的粉砂堆积层, 其厚度达 13 m 左右, 而由河口输出的泥沙, 在海州湾沿岸组成了粉砂淤泥沉积层, 其堆积厚度在灌河口 - 云台山以南达 10~15 m, 湾顶地区为 5~8 m, 到兴庄河口和拓汪一线则逐渐尖灭于滨海相砂层之中[12], 表明连云港航道海域为废黄河淤泥质沉积物。由于堆积速度快, 沉积物中的水分不易排出, 使得剪切强度下降, 在外力干扰下容易产生不稳定性。

根据浅地层剖面和《连云港港 30 万吨级航道地质钻探》资料, 确定各反射层对应的地层, 连云港海底航道沉积物以淤泥质粉砂和粉砂质粘土为主, 其次为粉砂质淤泥、粘土质粉砂和粘土。淤泥质粉砂呈灰色, 可见有水平分层, 航道大部分是淤泥质粉砂, 具有高压缩性, 为一种水下三角洲沉积物而成的低强度软土层。粉砂质粘土呈棕黄色, 软塑状态, 层理不清晰, 有薄的粉土和沙土, 可见粉质土层和块状物的局部层, 富含有机质, 具有中等压缩性, 强度不高, 是一般的软土层。淤泥质海底航道开挖后, 航道边坡沉积层受到切割、开挖面上应力释放, 含水量增加, 边坡的粘聚力降低、内摩擦角减少, 航道边坡坡肩已被水动力改造(图 1)。因此对航道边坡稳定性在统计分析的基础上采用分段或变边坡处理。

3.2. 航道边坡稳定性分析

稳定系数是判别边坡是否稳定的重要指标, 根据极限平衡理论, 海底航道边坡失稳滑塌必定存在一个极限平衡状态的滑动面, 使滑体处于临界失稳状态, 该滑动面摩擦力较小, 通常为层面、沉积界面或软弱层, 如流塑或软塑的淤泥质层。根据连云港海底航道浅地层剖面探测和钻探分析, 航道存在单一均质层、淤泥层夹杂、黏土软弱层, 因此, 在对航道边坡稳定性分析时, 按照均质边坡层、淤泥软弱层、黏土层针对其抗剪强度的控制因素粘聚力和内摩擦角利用 Geo-Slope 软件分别计算不同边坡、不同沉积性质以及淤泥层所选滑面的安全系数(表 1)。

表 1 为是典型边坡 1:7、1:10、变边坡(上层 1:10, 下层 1:5)、变边坡(上层 1:10, 下层 1:7)计算的航道边坡稳定性系数, 从中可以看出, 边坡不同安全系数不同, 1:10 边坡安全系数最大, 变边坡安全系数与下层边坡坡度关系较大, 下层坡角越小, 边坡越稳定。粉质粘土层安全系数大于淤泥质粘土层安全系数。从空间分布上看, 外航道外段航道边坡安全系数最大, 外航道内段航道边坡安全系数次之, 徐圩航道边坡安全系数最小, 这与航道边坡沉积层性质空间分布较为一致, 外航道内段航道边坡海相沉积淤泥

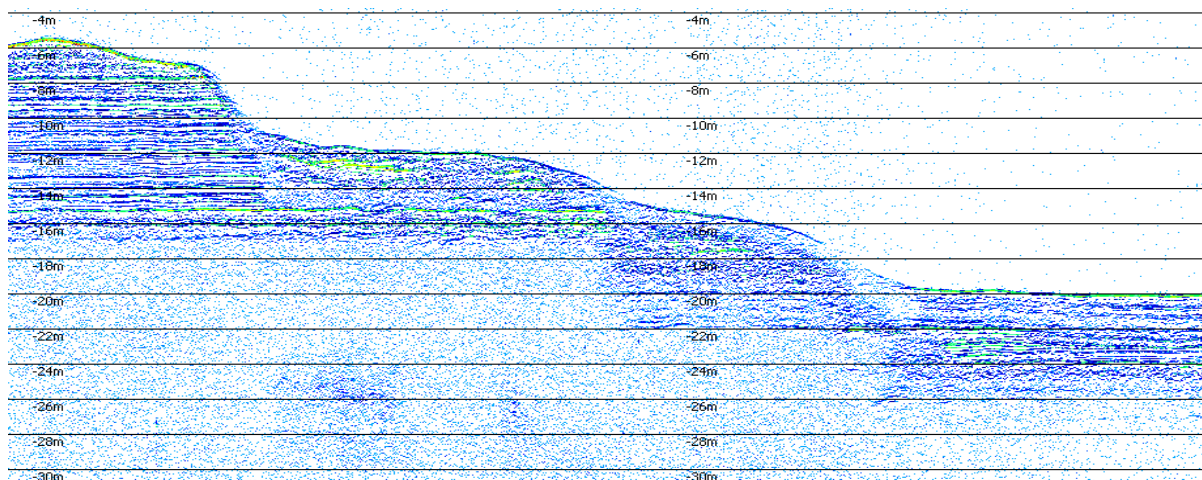


Figure 1. Sub-bottom profile of submarine channel

图 1. 航道边坡浅地层剖面图

Table 1. Slope safety factor of Lianyungang submarine channel

表 1. 连云港海底航道边坡安全系数

沉积层	边坡坡度			
	1:7	1:10	1:10/1:5	1:10/1:7
淤泥质粘土	11.99	12.92	9.29	11.21
粉质粘土	29.83	32.35	23.29	27.05

厚，沉积层的流塑性和强度低，外航道外段航道边坡海相沉积淤泥厚沉积变薄，沉积物粒度粗化，徐圩航道边坡沉积层粒度略粗，淤泥质分布不均匀。

3.3. 波流作用下航道边坡稳定性分析

航道边坡除受静荷载外，还受波流的动荷载作用，海水以流、浪等运动形式作用于航道斜坡，受动荷载的强度和周期使航道沉积物内产生相应的应力和孔隙水压力而引起有效应力降低。较强的动水压力在中密到疏松的土体内将产生周期变化的剪应力，从而导致海底航道边坡稳定性降低。波浪对海底沉积物的作用表现为波浪荷载产生的动水压力和对海底沉积物的剪应力，潮流对海底沉积物表现为剪应力。波流的周期荷载还会造成土的强度和模量下降，孔隙压力增高。表 2 为波流作用下连云港海底航道边坡安全系数。

Table 2. Slope safety factor of Lianyungang submarine channel under the interaction of current and wave

表 2. 波流作用下海底航道边坡安全系数

沉积层	边坡坡度			
	1:7	1:10	1:10/1:5	1:10/1:7
淤泥质粉粘土	6.23	7.87	5.68	6.37
粉质粘土	15.57	19.66	14.16	15.80

从表 2 可以看出施加波浪和潮流作用力后，航道边坡安全系数降低，由于海水在滑脱面上的润滑作用以及孔隙压力的作用，使航道边坡滑脱面上的摩擦力大为减小，因此，使得航道稳定性降低。航道边坡安全系数在空间上与静荷载下安全系数相似，外航道外段航道边坡安全系数最大，外航道内段航道边

坡稳定性系数次之,徐圩航道边坡安全系数最小。根据连云港航道海域“波浪掀沙、潮流输沙”规律[13],近岸破波区以内波浪掀沙作用强、海流多为顺岸往复流,与航道交角较大,波流对航道边坡作用力强,边坡稳定系数较小。破波区以外波浪掀沙作用弱、海流多为逆时针旋转流,波流对航道边坡作用力小,边坡稳定系数较大。

4. 结论

连云港海底航道沉积层主要为废黄河水下三角洲沉积物,沉积物以淤泥质粉砂和粉砂质粘土为主,其次为粉砂质淤泥、粘土质粉砂和粘土。淤泥质海底航道开挖后,航道边坡沉积层受到切割、航道边坡坡肩被水动力改造,坡肩附近被冲刷后,在自重力作用以及潮流的作用下进入航道底部发生淤积,同时坡肩逐步被刷深,坡度变缓,坡阶明显。

利用 Geo-Slope 软件对连云港海底航道边坡在不同条件下的稳定系数进行了计算,航道边坡在静荷载和动荷载作用下基本处于稳定状态,波流作用下航道边坡比静力作用下航道边坡安全系数大大降低。空间上,外航道外段航道边坡安全系数最大,外航道内段航道边坡稳定性系数次之,徐圩航道边坡安全系数最小,结果对航道安全运营以及风险防控具有重要的实践意义。

基金项目

江苏省重点研发计划项目(BE2018676)。

参考文献

- [1] 刘立. 周期荷载下饱和粘性土动力特性[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 1986.
- [2] 沈达博. 地层结构效应对沿海航道岸坡稳定性影响分析[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2017, 36(1): 77-80.
- [3] 刘涛, 陈国平. 波流共同作用下的航道边坡稳定性研究[J]. 水运工程, 2014(9): 103-108.
- [4] 丁琦, 谢军, 应铭. 波浪动力对开敞淤泥质海岸深水航道边坡稳定性的影响[J]. 水运工程, 2018(1): 106-111.
- [5] 张建锋, 王玉东, 侯海伟, 等. 开敞海域淤泥质浅滩深挖槽航道边坡研究[J]. 中国港湾建设, 2016, 36(12): 8-13.
- [6] 顾勇, 马兴华, 金雪英, 等. 连云港港 30 万吨级航道建设主要技术问题[J]. 水运工程, 2012(4): 123-128.
- [7] 刘家驹. 连云港不同走向外航道的回淤研究[J]. 海洋工程, 1984(2): 25-29.
- [8] 左书华, 杨华, 张娜, 等. 连云港徐圩港区航道大风天强淤可能性分析[J]. 水道港口, 2013, 34(1): 26-32.
- [9] 张林, 陈沈良, 谷国传. 连云港外航道海域环境演变与冲淤特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013(3): 29-36.
- [10] 周资斌. 基于极限平衡法和有限元法的边坡稳定分析研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 河海大学, 2004.
- [11] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第四分册) [M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [12] 王宝灿, 虞志英, 刘苍宇, 等. 海州湾岸滩演变过程和泥沙流动向[J]. 海洋学报, 1980, 2(1): 79-96.
- [13] 张存勇. 海州湾近岸海域现代沉积动力环境[M]. 北京: 海洋出版社, 2015.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2376-4260，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ams@hanspub.org