

考虑波浪动荷载的航道疏浚 边坡坡度确定方法

张林海^{1,2}, 马兴华¹, 郭冬冬¹, 陈 喆¹, 丁大志³, 黄东海¹

(1. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120; 2. 中交疏浚(集团)股份有限公司, 上海 200082;
3. 连云港港 30 万吨级航道建设指挥部, 江苏 连云港 222000)

摘要: 航道疏浚边坡坡度的确定关系到航道疏浚边坡稳定和航道的正常营运, 关系到疏浚工程量和工程投资的大小, 尤其对于浅滩深挖槽航道的影响更为突出。目前规范中确定疏浚边坡坡度仍采用查表法, 按照不同岩土类型给出航道边坡坡度取值范围, 并指出在强浪作用下的开敞航道需放缓坡度, 但没有给出考虑波浪动荷载的具体方法。依托连云港港 30 万吨级航道二期工程, 引入设计波浪标准并采用经验公式确定作用在航道疏浚边坡上的波浪动荷载, 采用振动三轴试验模拟疏浚边坡土体所受波浪动荷载作用, 取得受波浪荷载作用后的土体强度指标, 计算航道边坡土力学稳定安全系数, 形成一种定量考虑波浪动荷载影响的航道疏浚边坡坡度的确定方法。在规范一般规定的基础上, 为合理确定航道疏浚边坡坡度提供有益补充。

关键词: 波浪动荷载; 边坡坡度; 稳定计算

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)12-0146-07

Method for determining slope gradient of waterway dredging slopes considering wave dynamic loads

ZHANG Linhai^{1,2}, MA Xinghua¹, GUO Dongdong¹, CHEN Zhe¹, DING Dazhi³, HUANG Donghai¹

(1. CCCC Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China;

2. CCCC Dredging (Group) Co., Ltd., Shanghai 200082, China;

3. 300,000-ton Waterway Construction Headquarters of Lianyungang Port, Lianyungang 222000, China)

Abstract: The determination of slope gradient for waterway dredging is related to the stability of channel dredging slope and the normal operation of the waterway, as well as the dredging engineering quantity and engineering investment, especially for shallow and deeply excavated waterway. At present, the table lookup method is still used to determine the dredging slope gradient in the specification. The value range of waterway slope gradient is given according to different rock and soil types, and it is pointed out that slope gradient of open waterway under strong wave action needs to be slowed down, but there is no specific method to consider the wave dynamic loads. Based on phase II project of 300,000-ton class waterway in Lianyungang Port, this paper introduces the design wave standard and uses the empirical formula to determine the wave dynamic load acting on the dredging slope of waterway. The vibration triaxial test is used to simulate the wave dynamic load on the dredging slope soil, obtain the soil strength index after the wave load, calculate the soil mechanical stability safety factor of the waterway slope, and form a method for determining the waterway dredging slope quantitatively considering the influence of wave dynamic load. On the basis of the general provisions of the specification, it provides useful supplements for reasonably determining the slope gradient of waterway dredging slopes.

Keywords: wave dynamic load; slope gradient; stability calculation

收稿日期: 2025-04-03 录用日期: 2025-05-09

作者简介: 张林海(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水利、水运工程结构设计、研究与管理。

在缺少防波堤、自然岛屿等掩护的开敞海域, 外海波浪可直接传入和影响, 以往定性研究表明, 波浪对海域表层土质具有一定的软化作用, 在波浪较大时需要重视。

JTS 165—2013《海港总体设计规范》^[1]和 JTS 181—2016《航道工程设计规范》^[2]采用查表法给出了不同岩土类型(如淤泥、砂土、黏性土)的航道边坡坡度取值范围, 并指出在强浪、强流作用下的开敞航道需放缓坡度, 但没有给出考虑波浪动荷载的具体方法。顾勇等^[3]依托国家高技术研究发展计划(863 计划)课题(2012AA112509)《开敞海域淤泥质浅滩深水航道建设关键技术研究》子任务二《开敞海域淤泥质浅滩深挖槽航道总体设计关键技术研究》, 从边坡土力学稳定角度, 采用卸荷后的土体抗剪强度指标, 按照静水条件(无波浪动荷载)计算不同坡度条件下航道疏浚边坡稳定安全系数, 并结合现场开展局部疏浚试验, 观测疏浚后边坡的稳定性, 进而确定航道疏浚边坡的坡度。

本文参考相关文献, 对波浪作用下淤泥质浅滩航道边坡稳定性进行初步探讨^[4]。依托连云港 30 万吨级航道二期工程科研《开敞海域淤泥质浅滩深挖槽航道总体设计关键技术补充研究》子课题三《开敞海域淤泥质浅滩深挖槽航道边坡设计方法补充研究》^[5]和室内振动试验^[6], 研究提出了定量考虑波浪动荷载影响的航道疏浚边坡坡度的确定方法: 引入设计波浪标准并采用经验公式确定作用在航道疏浚边坡上的波浪动荷载; 采用振动三轴试验模拟疏浚边坡土体所受波浪动荷载作用, 取得受波浪软化作用后的土体强度指标; 叠加波浪荷载后, 计算疏浚边坡整体稳定安全系数; 以满足 JTS147—2017《水运工程地基设计规范》要求确定航道疏浚边坡取值, 为合理确定开敞海域航道疏浚边坡坡度提供科学依据, 实现船舶航行安全和节约航道工程投资的协调统一。

1 方法研究

1.1 初拟航道疏浚边坡坡度

根据拟建航道的地质, 依据 JTS 165—2013

《海港总体设计规范》和 JTS 181—2016《航道工程设计规范》规定, 结合工程实践经验, 初步拟建航道疏浚边坡若干个坡度方案。

1.2 波浪动荷载及其作用下边坡土体强度的确定

1.2.1 引入设计波浪标准

通常航道疏浚工程设计无设计波浪的概念, 致使无法定量研究波浪对航道边坡的影响。本文借鉴 JTS 154—2018《防波堤与护岸工程设计规范》^[7]的概念引入设计波浪标准, 根据拟建航道的疏浚边坡设计使用年限, 确定拟建航道疏浚边坡的设计波浪重现期标准和相应不同特征水位下的设计波要素, 为设计波浪荷载的计算提供依据。如疏浚边坡设计使用年限分别为 1、5、10、20 a, 设计波浪重现期标准可分别取 1~5 a 一遇、5~10 a 一遇、10~20 a 一遇、20~50 a 一遇。

1.2.2 设计波浪动荷载的确定

1) 根据实测波浪统计方法, 或采用 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》(2022 版)^[8]方法、莆田波浪公式、波浪数学模型的其中一种方法进行推算, 确定设计波浪重现期标准下不同设计水位对应的设计波要素。

2) 根据设计波浪重现期标准下不同设计水位对应的设计波要素, 确定拟建航道具具体航段处的最大波浪动荷载, 进而确定土样处疏浚边坡土体内部不同位置由波浪引起的最大波浪动荷载, 连同设计波要素的波周期和波浪作用时间, 作为室内振动三轴试验的加载。具体步骤如下。

步骤 1: 确定最危险波要素。根据设计波浪重现期标准下不同特征水位对应的设计波要素, 按照式(1)计算拟建航道段海底表面所受的波浪动荷载, 最大波浪动荷载对应的特征水位下的设计波要素为最危险波要素^[9]。

$$p_0 = \gamma_w \frac{H}{2} \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \quad (1)$$

式中: p_0 为航道疏浚边坡表面所受的波浪动压强幅值; γ_w 为水的重力密度; H 为有效波高 H_s 或取一系列波浪的系列波高 $H_{1\%} \sim H_{100\%}$; h 为水深; L 为波长。

步骤 2: 确定拟建航段航道疏浚边坡表面所受的波浪动荷载。根据最危险波要素, 通过现场试

验或室内物理模型试验、计算流体力学软件等方法,获得航道疏浚边坡表面所受的波浪动荷载过程。当航道边坡较缓时,可近似采用线性波理论,采用下式计算:

$$p = p_0 \sin [2\pi(x/L - t/T)] \quad (2)$$

式中: p 为航道疏浚边坡表面所受的波浪动荷载; x 为相对波浪节点的水平坐标; t 为时间; T 为波周期。

步骤 3: 确定拟建航段航道疏浚边坡内部土体所受的波浪动荷载。根据拟建航段航道疏浚边坡表面所受的波浪动荷载,通过现场实测或室内物理模型试验、有限单元法、相关理论公式计算等方法获得疏浚边坡内部不同位置由波浪引起的最大应力,连同设计波要素的波周期和波浪作用时间,作为室内振动三轴试验的加载。

1.2.3 采用室内振动三轴试验确定边坡土体强度

通过室内振动三轴试验确定土体在所述最大波浪动荷载作用下的土体强度指标。具体步骤如下。

步骤 1: 获取典型土样。通过地质勘察,获得拟建航道断面上有代表性的土样,取样须覆盖关系到土力学稳定的各主要土层,土样须为原状样。

步骤 2: 确定典型土样的室内振动三轴试验的加载。根据边坡整体稳定计算精度的需要,将疏浚边坡划分为若干区域,提取每个区域疏浚边坡内部不同位置由波浪引起的动荷载(依据 1.2.2 节步骤 3 结果)。

步骤 3: 进行室内振动试验。经系列试验,得到各土样在波浪动荷载下的动强度指标。对于淤泥、淤泥质土、黏土、粉土,振动试验后可立即进行三轴不固结不排水剪试验或无侧限抗压强度试验,抗剪强度指标可选择振动后的三轴不固结不排水剪切指标或振动后的无侧限抗压强度指标,后续采用总应力法求解。

1.2.4 缺少振动试验时的简化处理

当拟建航道工程处于前期研究阶段,尚未开展相关室内振动试验,若边坡地质为软黏土,根据相关研究成果,可将软黏土抗剪强度除以其灵敏度作为软黏土受波浪循环荷载作用后的抗剪强度^[10]。

1.3 边坡坡度的确定

建立航道疏浚边坡土力学稳定计算模型,在模型中输入室内振动三轴试验中得到的土体振动强度指标值及航道边坡表面所受的最大波浪动荷载值,计算拟建航道疏浚边坡若干个坡度方案下的航道疏浚边坡在波浪动荷载下的稳定安全系数。

所得整体稳定安全系数需满足 JTS 147—2017《水运工程地基设计规范》^[11]要求,拟建航道疏浚边坡设计使用期限较短时(<5 a),选取要求的安全系数范围的较小值作为整体稳定安全系数限值;拟建航道疏浚边坡设计使用期限较长时(≥ 5 a),选取要求的安全系数范围较大值作为整体稳定安全系数限值。分别选取对应整体稳定安全系数限值的边坡坡度作为拟建航道疏浚边坡的坡度。

2 方法应用

连云港拟扩建航道位于开敞海域、防波堤口门以外,典型航段位于自然海床高程 -8 m(即当地理论最低潮面以下 8 m),航道地质为抗剪强度低的淤泥,其常规物理力学指标见表 1,淤泥层底高程 -22.0 m,以下为抗剪强度很高的硬黏土层。

表 1 土层物理力学指标

Tab. 1 Physical and mechanical properties of soil layer

土层	天然密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	含水量	十字板剪切强度 S_u/kPa	有效剪强度指标 c'/kPa $\Phi'/(^{\circ})$	
淤泥	1.54	85%	5+1.5Z	4.7	16

注: Z 为泥面以下深度。

2.1 初拟航道疏浚边坡坡度

航道地质为淤泥,根据 JTS 165—2013《海港总体设计规范》表 6.4.9“不同岩土类别航道边坡坡度”,拟定拟建航道的疏浚边坡坡度为 $1:25 \sim 1:8$;同时,现有 25 万吨级航道疏浚边坡现场观测成果显示,航道疏浚边坡坡度整体稳定在 $1:7$ 。综合考虑,初拟航道疏浚边坡 $1:8$ 和 $1:7$ ^[12]。

2.2 波浪动荷载及其作用下边坡土体强度的确定

2.2.1 设计波浪标准的确定

根据拟建航道疏浚边坡设计使用年限,确定本航道疏浚边坡的设计波浪重现期标准为 10 a—

遇。结合实测波浪统计和波浪数学模型推算, 确定拟建航道在设计波浪重现期标准不同特征水位下的设计波要素(未开挖状态)见表 2。

表 2 各特征水位下设计波要素
Tab. 2 Design wave elements at each characteristic water level

特征水位	有效波高 H_s/m	平均水深 h/m	波长 L/m	波周期 T/s	波浪作用时间 D_u/h
极端低水位	2.20	7.45	58.4	7.5	5
设计低水位	2.49	8.55	61.7	7.5	5
中水位	2.81	10.95	66.9	7.5	5
设计高水位	3.14	13.36	72.9	7.5	5
极端高水位	3.26	14.46	73.9	7.5	5

注: 试样达到破坏标准(循环累积应变 15%)或作用时间达到 5 h 即停止振动。

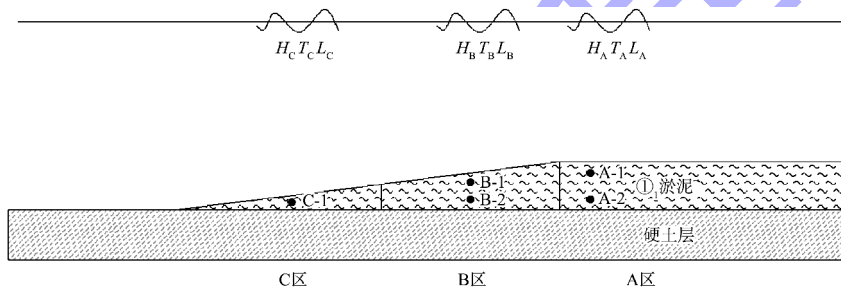


图 1 航道疏浚边坡典型区域采样点布置

Fig. 1 Layout of sampling points in typical areas of channel dredging slope

采用计算流体力学软件建立边坡模型, 输入设计高水位下的设计波要素, 提取航道疏浚边坡表面设计波浪过程; 在有限元软件中建立边坡模型, 将航道疏浚边坡表面的波浪过程荷载作为输入条件, 求取边坡土体各采用点在波浪荷载作用下的荷载幅值, 见表 3。

表 3 波浪引起的拟建航道疏浚边坡土体内部应力幅值
Tab. 3 Internal stress amplitude of dredged slope soil of proposed channel caused by waves

区域	点位	应力幅值/kPa
A	A-1	9.0
	A-2	7.3
B	B-1	9.0
	B-2	7.4
C	C-1	4.6

2.2.3 采用室内振动三轴试验确定边坡土体强度

室内振动试验采用动三轴试验仪(dynamic triaxial apparatus, GDS), 见图 2, 该试验仪器由英

2.2.2 设计波浪动荷载的确定

依据式(1)确定滩面所受波浪动荷载数值: 极端低水位工况 8.44 kPa、设计低水位工况 9.11 kPa、中水位工况 9.15 kPa、设计高水位工况 9.18 kPa、极端高水位工况 9.01 kPa。因此, 设计高水位及其对应的设计波要素为最不利的设计水位和设计波要素组合。

根据计算精度需要, 将航道边坡划分为若干典型区域, 其中采样点 A-1、B-1 位于边坡表层以下 0.5 m, 其中采样点 A-2、B-2 位于淤泥层底面以上 0.5 m, C 区厚度较小, 以 C-1 点为代表。分区和采样点见图 1。

国 GDS 仪器设备有限公司生产, 可以给圆柱土样从压力室底座施加轴向力和轴向变形, 也可以非常精确地完成静态和小应变三轴试验。



图 2 GDS 动三轴试验仪

Fig. 2 GDS dynamic triaxiality tester

加载过程见图 3^[13]。首先将试样在自重应力下固结,再施加轴压,由于航道疏浚边坡为开挖边坡,轴压施加值为负,数值等于上层开挖淤泥的有效自重应力值;其次进行室内振动三轴试验(振动三轴不固结不排水试验),按表 3 中的应力幅值,连同设计波要素的波周期和波浪作用时间,作为室内振动三轴试验的加载条件;最后在振动荷载施加完之后立即进行三轴不固结不排水试验,得到各土样在波浪循环荷载作用后的强度指标。

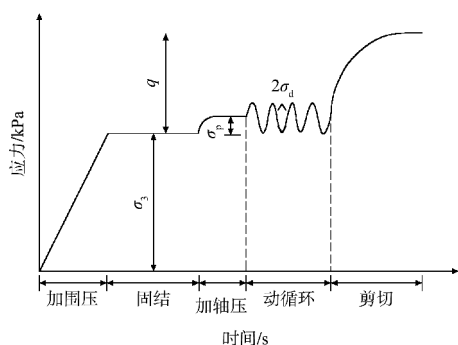
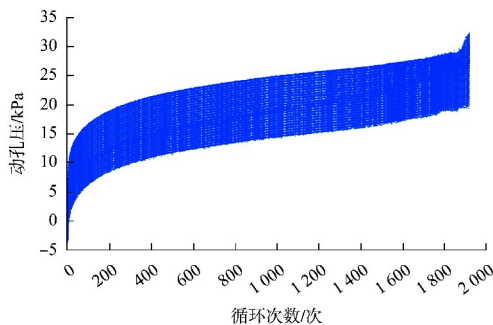
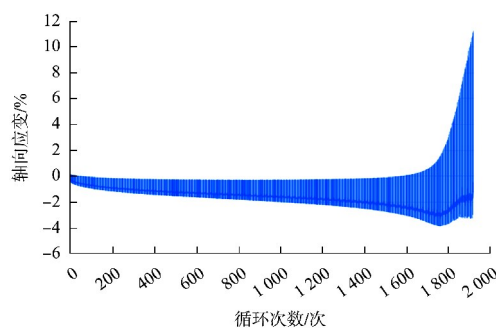


图 3 加载模式
Fig. 3 Load mode

典型试样在循环荷载加载过程中动孔隙水压力和轴向应变随振动的变化过程见图 4。由图可知超静孔隙水压力在振动初期便迅速累积至约 15 kPa,随后以一定斜率缓慢向 y 轴正方向发展,逐渐累积至接近初始固结围压时(30 kPa),试样发生破坏。试样轴向应变在振动初期往 y 轴负方向发展(拉伸),振动末期接近破坏时, y 轴正方向轴向应变迅速累积(压缩),即试样先产生拉应变,累积到一定程度后向压应变发展,最后受压破坏。



a) 动孔隙水压力变化过程



b) 轴向应变变化过程

图 4 典型试样在循环荷载加载过程中动孔隙水压力和轴向应变随振动变化

Fig. 4 Variation of dynamic pore water pressure and axial strain of typical samples during dynamic cycle loading

选取 A、B、C 区域内多个试样进行试验,试验施加的循环荷载值可根据试样所处位置通过表 3 中的点位数据差值得到。A、B 区域分为上下 2 层, C 区域为 1 层,各区域的抗剪强度值取区域内试样试验结果的平均值,其结果见表 4。

表 4 边坡各区域土体振动过后强度指标

Tab. 4 Strength index of soil mass in each area of slope after vibration

区域	土层	振动后抗剪强度指标/kPa
A	上层	4.9
	下层	14.2
B	上层	6.6
	下层	11.2
C	-	8.1

2.3 确定设计边坡

建立航道疏浚边坡稳定计算模型,并将表 4 中的土体动参数指标赋值给对应的模型区域;添加航道边坡表面所受波浪动荷载;采用 JTS 147—2017《水运工程地基设计规范》中的边坡稳定计算公式计算航道疏浚边坡在波浪动荷载下的稳定安全系数。

计算结果显示,当航道疏浚边坡坡度为 1:8 时,航道疏浚边坡最小稳定安全系数为 1.536,见图 5,其结果比静水条件(无波浪动荷载)下、且不考虑软黏土强度软化时的稳定安全系数减小约 45%,见图 6;当航道疏浚边坡坡度为 1:7 时,航道疏浚边坡土力学稳定系数为 1.398,见图 7。

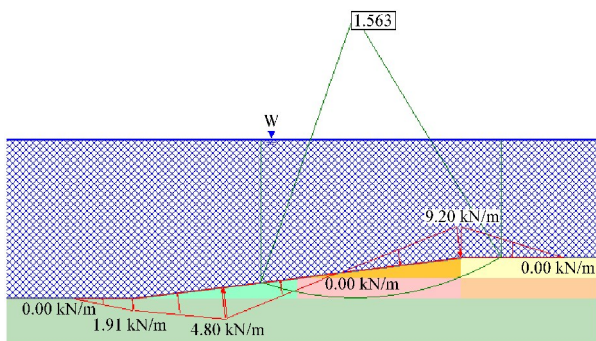


图 5 考虑波浪动荷载影响的航道疏浚边坡整体稳定计算结果 (边坡坡度 1:8)

Fig. 5 Calculation results of stability of channel dredging slope considering influence of wave dynamic load (slope 1:8)

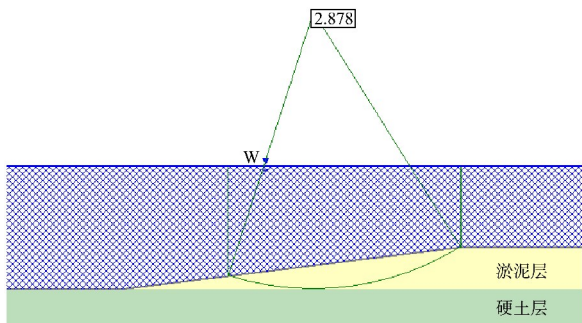


图 6 未考虑波浪动荷载影响的航道疏浚边坡整体稳定计算结果 (边坡坡度 1:8)

Fig. 6 Calculation results of stability of channel dredging slope without considering influence of wave dynamic load (slope 1:8)

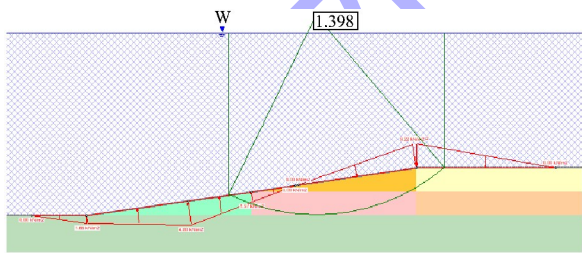


图 7 考虑波浪动荷载影响的航道疏浚边坡整体稳定计算结果 (边坡坡度 1:7)

Fig. 7 Calculation results of stability of channel dredging slope considering influence of wave dynamic load (slope 1:7)

查询 JTS 147—2017《水运工程地基设计规范》表 6.4.1 中对整体稳定抗力分项系数的要求, 由于本文案例采用分层三轴不固结不排水剪指标, 类似于十字板剪指标, 整体稳定抗力分项系数取 1.1~1.3; 加之拟建航道疏浚边坡设计使用年限较

长 (≥ 5 a) 时, 选取要求的安全系数范围的较大值作为整体稳定安全系数限值, 即 1.3。因此选择疏浚边坡坡度 1:7 可满足稳定要求。

JTS 165—2013《海港总体设计规范》表 6.4.9 “不同岩土类别航道边坡坡度”中对于淤泥土类的航道疏浚边坡要求为 1:25~1:8。表中航道边坡坡度取值范围根据天津港、连云港港、广州港、汕头港、黄骅港、秦皇岛港、京塘港和东营港等港口航道实例的 1 453 个岩土有关指标及 1 812 个相应边坡坡度的统计分析结果, 同时参考了国内外航道边坡设计标准, 具有较广的代表性, 而且涵盖了影响航道边坡坡度的有关因素 (包括岩土特性、土体物理力学指标、波浪、潮流流速、流向和船行波等)。同时指出航道边坡坡度“通过试验或按类似岩土特性和水文条件确定边坡坡度更为合理。”本文结合现有 25 万吨级航道疏浚边坡现场观测成果, 即现有航道疏浚边坡坡度整体稳定在 1:7; 且通过动三轴试验得到土体动强度参数, 验算了 30 万吨级航道边坡坡度在 1:7 时可以满足整体稳定要求。经综合分析, 航道疏浚边坡确定为 1:7。

3 结语

1) 本文通过引入设计波浪标准与室内振动试验, 量化了波浪动荷载对边坡土体强度的软化作用, 在定量考虑波浪循环荷载作用下, 航道边坡土体的抗剪强度指标降低, 进而量化了其对航道疏浚边坡土力学稳定的不利影响, 解决了现有技术未定量考虑波浪动荷载对航道疏浚边坡土力学稳定的不利影响问题。

2) 案例计算表明, 考虑波浪动荷载时, 1:8 坡度时安全系数为 1.536, 较静水条件 (无波浪作用) 下降约 45%, 1:7 坡度时安全系数是 1.398。两种方案均可满足 JTS 147—2017《水运工程地基设计规范》要求的稳定安全系数 (> 1.3); 根据现有 25 万吨级航道坡度 1:7 的疏浚边坡现场观测成果, 按照 JTS 165—2013《海港总体设计规范》的边坡坡度取值原则, 即“通过试验或按类似岩土特性和水文条件确定边坡坡度更为合理”, 可以取疏浚量更少的 1:7 坡度作为设计方案。

3) 该研究需依赖室内动三轴试验获取土体动抗剪强度指标, 土体受循环荷载后的强度变化与土体受振动前的应力历史、排水条件、循环荷载特征等因素密切相关。后续建议结合地区特征土层, 待收集大量土体振动试验参数后, 建立可供工程应用的土体振动后强度指标与振动荷载特征(大小、周期等)相关关系的简化公式或图表, 以完善设计体系。

参考文献:

- [1] 海港总体设计规范: JTS 165—2013[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2013.
Design code of general layout for sea ports: JTS 165-2013[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2013.
- [2] 航道工程设计规范: JTS 181—2016[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.
Design code for waterway engineering: JTS 181-2016[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2016.
- [3] 顾勇, 马兴华, 金雪英, 等. 国家高技术研究发展计划(863 计划)课题(2012AA112509)《开敞海域淤泥质浅滩深水航道建设关键技术研究》子任务二《开敞海域淤泥质浅滩深挖槽航道总体设计关键技术研究》[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2015.
GU Y, MA X H, JIN X Y, et al. “Key technologies for the overall design of deep-dredged channels in open sea muddy shoals”, subtask 2 of the national high-tech research and development program (863 program) project (2012AA112509) “Key technologies for the construction of deepwater channels in open sea muddy shoals” [R]. Shanghai: CCCC Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., 2015.
- [4] 张林海, 陈巍博. 波浪作用下淤泥质浅滩航道边坡稳定性初探[J]. 港工技术, 2020, 57(6): 8-11.
ZHANG L H, CHEN W B. Study on channel slope stability of muddy shoal under wave action [J]. Port engineering technology, 2020, 57(6): 8-11.
- [5] 马兴华, 郭冬冬, 张林海, 等. 《开敞海域淤泥质浅滩深挖槽航道总体设计关键技术补充研究》子课题三《开敞海域淤泥质浅滩深挖槽航道边坡设计方法补充研究》[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2025.
MA X H, GUO D D, ZHANG L H, et al. “Supplementary research on slope design methods for deep-dredged channels in open sea muddy shoals”, subtask 3 of “supplementary research on key technologies for the overall design of deep-dredged channels in open sea muddy shoals” [R]. Shanghai: CCCC Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., 2025.
- [6] 贾敏才, 杨崎可, 卢葭晨, 等. 连云港淤泥与粉土波浪荷载作用下的强度分析[R]. 上海: 同济大学, 2025.
JIA M C, YANG Q K, LU J C, et al. Strength analysis of mud and silty soil in Lianyungang under wave loading [R]. Shanghai: Tongji University, 2025.
- [7] 防波堤与护岸设计规范: JTS 154—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
Code of design for breakwaters and revetments: JTS 154-2018 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.
- [8] 港口与航道水文规范: JTS 145—2015(2022 版)[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2022.
Code of hydrology for harbor and waterway: JTS 145-2015 (2022 edition) [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2022.
- [9] POULOS H G. 海洋岩土工程[M]. 上海: 同济大学出版社, 2017.
POULOS H G. Marine geotechnics [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2017.
- [10] BOULANGER R W, IDRIS I M. Liquefaction susceptibility criteria for silts and clays[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2006, 132(11): 1413-1426.
- [11] 水运工程地基设计规范: JTS 147—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.
Code for foundation design on port and waterway engineering: JTS 147-2017 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2017.
- [12] 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, 128.
DING Q, XIE J, YING M. Impact of wave dynamic on slope stability of muddy deepwater channel in open sea [J]. Port & waterway engineering, 2018(1): 106-111, 128.
- [13] 黄明毅. 波浪力作用下半圆体结构地基应力分析研究[J]. 水运工程, 2006(S2): 34-41.
HUANG M Y. Analysis and study on ground stresses of semi-circular structure under wave actions [J]. Port & waterway engineering, 2006(S2): 34-41.

(本文编辑 赵娟)