



STEM波作用下直立式与斜坡式结构连接段 护面块体设计*

王军, 蒋腊梅, 冯浩, 赵敏, 顾祥奎

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 针对STEM波作用下直立式与斜坡式结构连接段护面块体的设计, 分析现有规范公式和多个工程案例的试验数据, 提出连接段护面块体稳定质量的计算方法, 并通过实际工程的三维物理模型试验进行验证。结果表明: STEM波作用下连接段护面块体采用Hudson公式计算的稳定质量偏小, 应适当放大; 采用Hudson公式计算连接段扭王字块体的稳定质量时, 建议块体稳定系数 K_D 取11.5, 稳定质量取公式计算值的2~3倍; 由于影响STEM波的因素复杂, 实际工程中建议通过三维物理模型试验验证设计方案的合理性。

关键词: STEM波; 直立式与斜坡式结构; 连接段; 护面块体

中图分类号: U656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)03-0182-08

Design of armour blocks at transition of vertical and slope structures under STEM wave action

WANG Jun, JIANG Lamei, FENG Hao, ZHAO Min, GU Xiangkui

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Aiming at the design of armor blocks at the transition between vertical and slope structures under the impact of STEM waves, we analyze existing code formulas and test data of multiple engineering cases, propose a calculation method for the stable mass of armor blocks at the transition and validate through three-dimensional physical model tests of practical projects. The results indicate that the stable mass of armor blocks under STEM waves at the transition calculated by the Hudson formula is underestimated and should be appropriately increased. When the stable mass of Chinesepeodes at the transition is calculated, it is recommended that the stability coefficient K_D should be 11.5, and the stable mass should be taken as 2 to 3 times the value calculated by the formula. Due to complex factors affecting STEM waves, it is suggested to verify the rationality of the design scheme of practical project through three-dimensional physical model tests.

Keywords: STEM wave; vertical and slope structures; transition; armour block

当波浪沿直立式结构以一定角度入射时, 沿程会发生波高增大和壅水现象, 形成“STEM波”^[1], 其波能沿直立式结构传播时迅速集中, 在直立式

和斜坡式结构连接位置, 波浪发生破碎, 对连接段护面结构产生剧烈冲击, 严重影响结构安全。关于STEM波冲击下直立式和斜坡式结构连接段

收稿日期: 2024-09-27

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFB2604200)

作者简介: 王军 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口工程设计。

护面块体的设计,目前尚无有效的计算公式,实际中一般通过三维物理模型试验确定护面块体的稳定质量,成本高且确定方案耗时长,因此对该问题有待深入研究。张华昌等^[2]通过三维物理模型试验研究,认为当波浪方向与直立堤轴线夹角成 $15^{\circ}\sim 24^{\circ}$ 时对连接段斜坡堤护面块体的稳定性影响较大,受影响最大的部位集中在斜坡堤和直立堤相交的扇形坡面和堤身段波流掠过的区域。耿宝磊等^[3]通过三维物理模型试验得到结论:在直立堤轴线方向上,当入射角度小于 30° 时,波能随波浪传播沿堤积累,并与传播距离呈线性趋势上升,最大可达到堤头处波能的12~14倍;在直立堤法线方向上,波能随离堤距离的增大逐渐衰减,并呈现一定的周期性。杨博等^[4]提出当波浪入射角度 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 时,STEM波现象较为明显;但在增大到 40° 后,STEM波比波高的增加有变缓趋势。

本文根据相关文献给出的工程案例的试验数据,经过分析提出STEM波作用下直立式和斜坡式结构连接段护面块体稳定质量的计算方法,并将其应用在盐田港区东作业区集装箱码头一期工程陆域东南角的东侧直立式护岸和斜坡式护岸连接段护面块体设计中,并通过局部三维物理模型试验的验证,证明本文提出的方法具有良好的适用性和实用性。

1 工程概况

盐田港区东作业区集装箱码头一期工程位于深圳市盐田区大鹏湾北岸,工程拟建设3个20万吨级集装箱泊位,码头岸线长1470 m,后方陆域总面积约120.11万 m^2 ,主要布置集装箱堆场、道路、配套设施等^[5]。

本工程在陆域东南角区域新建护岸与码头衔接,并回填成陆,见图1。新建陆域东侧护岸采用直立式方块结构,胸墙顶高程9.50 m(盐田理论最低潮面,下同),结构长度见图2,断面见图3;与现有护岸连接段采用斜坡式结构,扇形坡面,断面见图4,护面块体采用20 t扭王字块,坡度1:1.5,胸墙顶高程9.50 m;后方现有护岸为斜坡式结构,护面块体采用13 t扭王字块,坡度1:1.4;新建护岸海底高程 $-10.50\sim -9.00$ m。

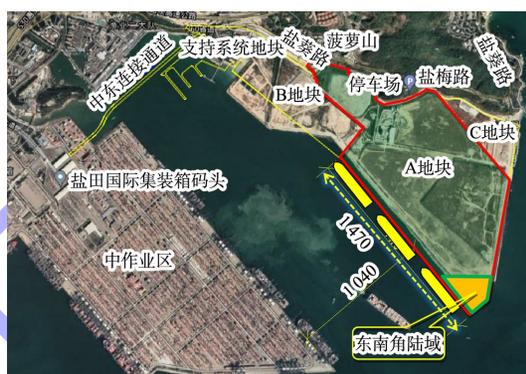


图1 盐田港区东作业区集装箱码头一期工程陆域布置 (单位:m)

Fig.1 Land layout of phase 1 project of container terminal in east operation area of Yantian Port (unit: m)

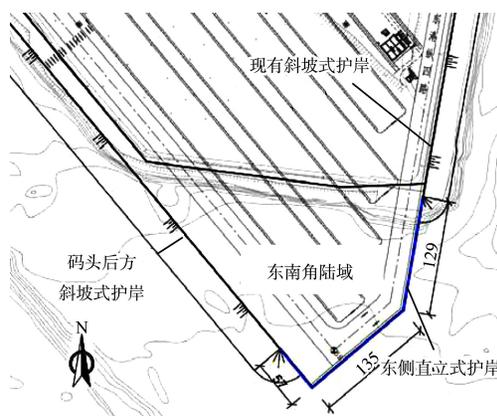


图2 东南角陆域护岸平面布置 (单位:m)

Fig.2 Planar layout of land revetment in southeast corner (unit: m)

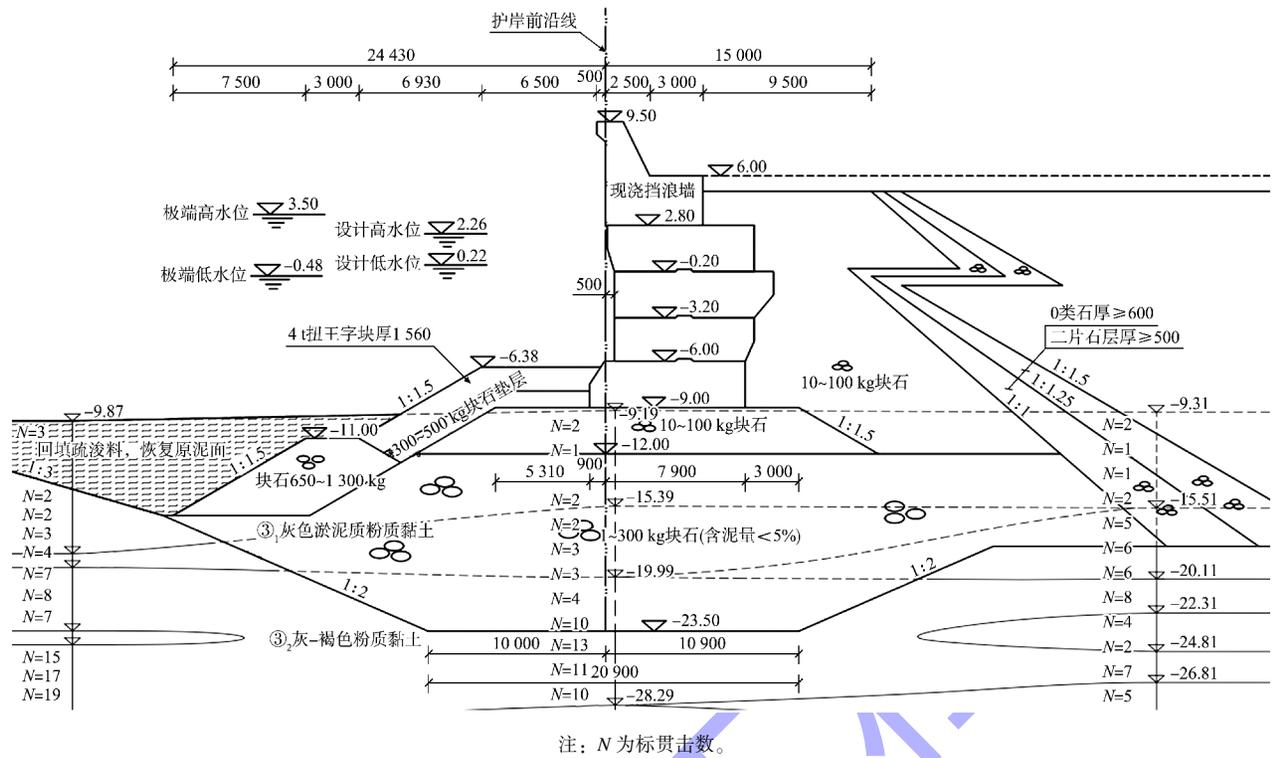


图3 东侧直立式护岸断面 (尺寸: mm; 高程: m)

Fig. 3 Section of vertical revetment on east side (dimension: mm; elevation: m)

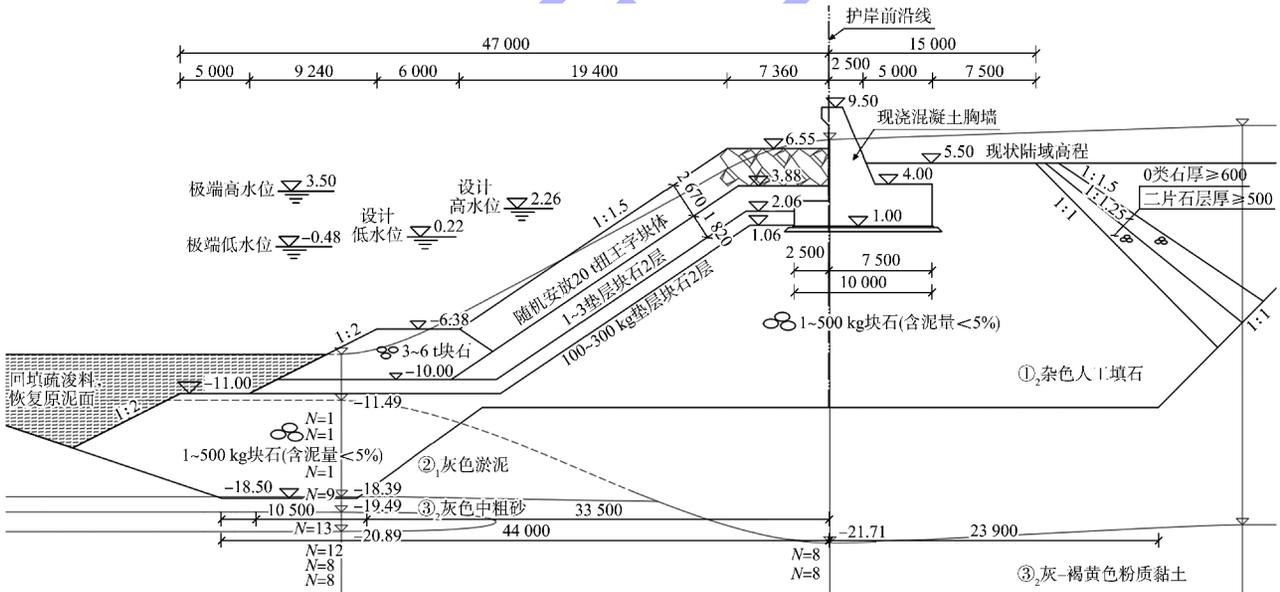


图4 连接段斜坡式断面 (尺寸: mm; 高程: m)

Fig. 4 Section of slope revetment at transition (dimension: mm; elevation: m)

(重现期 50 a 一遇极值高水位)。

2 设计条件

2.1 水位

本工程设计水位(盐田理论最低潮面)为:设计高水位 2.26 m(高潮累积频率 10%),设计低水位 0.22 m(低潮累积频率 90%),极端高水位 3.50 m

2.2 波浪条件

工程护岸设计波浪重现期为 100 a,设计波浪要素见表 1,波浪方向为 SE—SSE,与直立式护岸轴线夹角 21°~66°,波浪特征点位置见图 5。

表 1 SE—SSE 向 100a 一遇设计波要素
Tab. 1 Design wave parameters of 100-year return period in SE to SSE direction

水位	特征点	$H_{1\%}/m$	$H_{4\%}/m$	$H_{5\%}/m$	$H_{13\%}/m$	平均波高 H_m/m	周期 T/s	波长 L/m
极端高水位	1#	7.04	6.14	5.98	5.17	3.47	11.8	128.9
	2#	6.15	5.35	5.20	4.48	2.99	11.8	124.9
设计高水位	1#	6.70	5.86	5.71	4.95	3.35	11.8	124.0
	2#	6.12	5.35	5.21	4.51	3.05	11.8	120.6



图 5 波浪特征点位置

Fig. 5 Position of characteristic points of waves

3 斜坡式护岸护面块体的稳定质量计算

根据 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》^[6], 斜坡式护岸的护面块体稳定质量计算采用 Hudson 公式:

$$W = \frac{0.1\gamma_b H^3}{K_D (S_b - 1)^3 \cot \alpha} \quad (1)$$

$$S_b = \frac{\gamma_b}{\gamma} \quad (2)$$

表 2 采用 Hudson 公式计算的扭王字块稳定质量

Tab. 2 Stable mass of Chinesepeodes calculated by Hudson's equation

部位	计算采用波高 $H_{5\%}/m$	坡度	K_D	护面材料重力密度/($kN \cdot m^{-3}$)	海水重力密度/($kN \cdot m^{-3}$)	护面块体稳定质量/t
堤身	5.21	1:1.4	15.0	23	10.25	8.05
堤头	5.21	1:1.5	11.5	23	10.25	9.80

4 STEM 波对护面块体稳定质量的影响

4.1 烟台西港区码头起步工程

张慈珩等^[9]对烟台西港区码头起步工程东部的码头海侧直立结构与斜坡结构相交处护面块体稳定性进行三维物理模型试验研究, 主要设计参数为: 斜坡堤坡度 1:1.5, 护面块体为扭王字块, 原设计护面块体质量为 6 t; 设计波浪 $H_{5\%} = 5.43$ m、 $H_{13\%} = 4.60$ m, 波浪入射角与结构物夹角最大为 22.5°。三维物理模型试验结果: 扭王字块稳定质量 19 t(坡度 1:2)。

式中: W 为单个块石、块体的稳定质量, t; γ_b 为块石、块体材料的重力密度, kN/m^3 ; H 为设计波高, m, 根据 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》^[7], 平均波高与水深比值 $\bar{H}/d \geq 0.3$ 时采用 $H_{13\%}$, $\bar{H}/d < 0.3$ 时采用 $H_{5\%}$; K_D 为块体稳定系数, 对于扭王字块体, K_D 取 15~18; α 为斜坡与水平面的夹角, (°); γ 为水的重力密度, kN/m^3 。

扭王字块体的稳定系数参考 *The Rock Manual*^[8] 中的建议值: 对于堤身 K_D 取 15, 对于堤头 K_D 取 11.5。直立式和斜坡式结构连接段一般做成扇形坡面, 类似斜坡堤的堤头, 因此连接段扭王字块体的稳定系数建议 K_D 取 11.5。

采用 Hudson 公式计算得本工程斜坡式护岸护面块体的稳定质量见表 2。根据计算, 堤身护面块体稳定质量为 8.05 t, 堤头护面块体稳定质量 9.80 t, 因此本工程现有护岸采用 13 t 扭王字块可以满足护面块体的稳定质量要求。

4.2 某海岸工程

张华昌等^[10]对某海岸工程的直立式防波堤的接岸斜坡堤进行三维物理模型试验研究, 以研究该接岸斜坡堤在台风作用下破坏的原因, 为工程修复提供依据, 主要设计参数为: 斜坡堤坡度 1:2, 护面块体为扭王字块, 原设计护面块体质量为 10 t, 设计波浪 $H_{5\%} = 5.78$ m (推算波高)、 $H_{13\%} = 4.88$ m, 波浪入射角与结构物夹角为 5°~42°。三维物理模型试验结果: 扭王字块临界稳定质量为 25 t(坡度 1:2)。

4.3 烟台港西港区防波堤二期工程

辛兆强等^[11]对烟台港西港区防波堤二期工程的直立式与斜坡式结构的连接段进行三维模型试验研究,主要设计参数为:斜坡堤坡度 1:1.5,护面块体为扭王字块,原设计护面块体质量为 8 t,设计波浪 $H_{5\%} = 5.4$ m、 $H_{13\%} = 4.57$ m。波浪入射角与结构物夹角未知。三维物理模型试验结果:扭王字块稳定质量为 25 t(坡度 1:1.5)。

4.4 大连某护岸

张超等^[12]对大连某护岸直立式与斜坡式过渡

段护面块体稳定质量进行三维物理模型试验研究,主要设计参数为:斜坡式护岸坡度 1:1.5,护面块体为扭王字块,原设计护面块体质量为 10 t,设计波浪 $H_{5\%} = 4.63$ m、 $H_{13\%} = 4.00$ m,波浪入射角与结构物夹角为 35°。三维物理模型试验结果:扭王字块稳定质量为 20 t(坡度 1:1.5)。

4.5 工程案例计算结果分析

根据 Hudson 公式对上述工程案例进行计算,得到的结果见表 3。

表 3 各工程案例护面块体稳定质量计算结果

Tab. 3 Calculation results of stable mass of armour blocks in each engineering case

工程名称	护面块体种类	坡度	K_D	采用波高	护面块体稳定质量/t			
					原设计	计算值	试验值	试验值/计算值
烟台西港区码头起步工程	扭王字块	1:2	11.5	$H_{5\%}$	6	8.32	19	2.28
某海岸工程	扭王字块	1:2	11.5	$H_{5\%}$	10	10.03	25	2.49
烟台港西港区防波堤二期工程	扭王字块	1:1.5	11.5	$H_{5\%}$	8	10.91	25	2.29
大连某护岸	扭王字块	1:1.5	11.5	$H_{5\%}$	10	6.88	20	2.91

注:根据 JTS 145—2015《港口与航道水文规范》,斜坡式建筑物护面块体稳定性计算,当 $H/d < 0.3$ 时,设计波高累积频率取 5%,所选工程案例均满足该条件。

从上述计算结果分析,连接段护面块体采用扭王字块时,通过三维物理模型确定的块体稳定质量一般为 Hudson 公式堤头块体稳定质量计算值的 2~3 倍。

本工程波浪方向与直立式护岸轴线夹角 21°~66°,存在发生 STEM 波的可能性,因此盐田港区东作业区集装箱码头一期工程东南角东侧直立式护岸和斜坡式护岸连接段护面扭王字块质量暂定 20 t,为 Hudson 公式计算值 9.80 t 的 2.04 倍,护面块体的稳定性通过三维物理模型试验验证。

部物理模型试验有 3 个方案验证连接段护面块体的稳定性。



图 6 三维模型试验

Fig. 6 Three-dimensional physical model test

5 三维物理模型试验

深圳港盐田港区东作业区集装箱码头工程一期工程局部护岸波浪整体模型试验^[13]在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室长短周期复合造波水池中进行,见图 6。采用正态模型,根据 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》^[14]以及试验技术要求,局部整体试验模型比尺采用 1:40。试验采用的波浪要素见表 1。本工程局

5.1 方案 1:连接段护面采用 13 t 扭王字块

直立式护岸与斜坡式护岸连接段采用扇形坡面,坡度 1:1.5,护面块体采用 13 t 扭王字块;后方护岸护面块体采用 13 t 扭王字块,坡度 1:1.4。在 100 a 一遇 SSE 向波浪作用下,连接段发生部分扭王字块滚落的现象,见图 7。



图7 方案1在100 a一遇SSE向波浪作用下状态
Fig.7 Scheme one, state under action of 100-year return period SSE-directional waves

5.2 方案2:连接段护面上部20 t扭王字块、下部13 t扭王字块

直立式护岸与斜坡式护岸连接段采用扇形坡面,坡度1:1.5,在极端高水位静水面以下1倍波高范围内至坡顶的连接段扭王字块采用20 t,其余扭王字块保持13 t。在100 a一遇SSE向波浪作用下,扭王字块保持稳定状态,试验前后对比见图8。



a) 初始



b) 试验后

图8 方案2在100 a一遇SSE向波浪作用前后状态
Fig.8 Scheme two, states before and after action of 100-year return period SSE-directional waves

5.3 方案3:连接段护面采用20 t扭王字块

护面块体全部采用20 t扭王字块,在100 a一遇SSE向波浪作用下护面块体保持稳定。试验前后对比见图9。



a) 初始



b) 试验后

图9 方案3在100 a一遇SSE向波浪作用前后状态
Fig.9 Scheme three, states before and after action of 100-year return period SSE-directional waves

根据三维物理模型试验结果,本工程连接段护面块体采用20 t扭王字块,坡度1:1.5,可以满足稳定性要求。

6 结论

1) 波浪沿直立式结构以一定角度入射时,会发生STEM波现象,波高增大,波能沿程集中,对直立式和斜坡式结构连接段护面块体的稳定性造成很大影响。

2) 直立式结构在大海中受各方向的波浪作用,STEM波发生的概率很大,在设计过程中不容忽视。

3) 结合多个工程案例和本工程三维物理模型试验结果,STEM波作用下连接段护面块体采用Hudson公式计算的稳定质量偏小,应适当放大。

4) 采用 Hudson 公式计算连接段扭王字块体稳定质量时, 建议块体稳定系数 K_D 取 11.5, 稳定质量取公式计算值的 2~3 倍。

5) 对于其他护面块体, 连接段块体的稳定质量所需放大系数可能有所差异, 如阿尔及利亚 Bethioua 矿石码头项目中直立堤和斜坡堤连接段采用 Antifer 护面块体^[15], 计算值 45 t, 三维模型试验的稳定质量 70 t, 试验值是计算值的 1.56 倍。

6) 结合类似工程经验, 可以采取加大块体质量、优化坡度、增设潜堤等措施提高连接段护面块体的稳定性。

7) STEM 波受波浪入射角、波浪周期、波陡、直立结构是否开孔等因素影响。由于影响 STEM 波的因素复杂, 建议通过三维物理模型试验验证设计方案的合理性。

参考文献:

- [1] MASE H, MEMITA T, YUHI M, et al. Stem waves along vertical wall due to random wave incidence [J]. *Coastal engineering*, 2002, 44(4): 339-350.
- [2] 张华昌, 董胜, 柳玉良, 等. 斜向浪沿直立堤传播规律及对接岸斜坡堤影响[C]//中国海洋工程学会第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2011: 727-731.
ZHANG H C, DONG S, LIU Y L, et al. The propagation law of oblique waves along vertical embankments and their impact on sloping embankments on the docking bank [C]// *Proceedings of the 15th China Marine (Coastal) Engineering Academic Symposium*. Beijing: China Ocean Press, 2011: 727-731.
- [3] 耿宝磊, 刘二利, 张慈珩, 等. 斜向浪沿直立结构传播时能量变化的试验研究[J]. *水道港口*, 2020, 41(6): 635-642.
GENG B L, LIU E L, ZHANG C H, et al. Experimental study on energy variation of oblique wave propagating along vertical structure [J]. *Journal of waterway and harbor*, 2020, 41(6): 635-642.
- [4] 杨博, 潘军宁, 沈雨生. 斜向波浪作用下直立防波堤前沿波浪特性试验研究[J]. *水运工程*, 2023(12): 1-7.
YANG B, PAN J N, SHEN Y S. Experimental study on front wave characteristics of vertical breakwater under oblique wave action [J]. *Port & waterway engineering*, 2023(12): 1-7.
- [5] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 盐田港区东作业区集装箱码头工程一期工程施工图设计[R]. 上海: 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 2022.
CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd. Detailed design for phase 1 of the container terminal project at east operation area of Yantian Port [R]. Shanghai: CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., 2022.
- [6] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 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.
CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd. Code of design for breakwaters and revetments: JTS 154-2018 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.
- [7] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 2022 版. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2022.
CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd. Code of hydrology for harbour and waterway: JTS 145-2015 [S]. 2022 ed. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2022.
- [8] CIRIA, CUR, CETMEF. The rock manual: the use of rock in hydraulic engineering [M]. 2nd ed. London: CIRIA, 2007.
- [9] 张慈珩, 陈汉宝, 耿宝磊, 等. STEM 波作用下斜坡式结构护面块体稳定性的物理模型研究[J]. *水道港口*, 2013, 34(6): 488-492.
ZHANG C H, CHEN H B, GE B L, et al. Physical model on stability of sloping breakwater armor unit under STEM wave action [J]. *Journal of waterway and harbor*, 2013, 34(6): 488-492.
- [10] 张华昌, 董胜, 张义佐, 等. 小角度斜向浪对接岸斜坡堤稳定影响的试验研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2013(2): 171-176.
ZHANG H C, DONG S, ZHANG Y Z, et al. Experiment study of stability effect induced by small angular incident oblique wave on the shore-connecting mound breakwater[J]. *Transaction of oceanology and limnology*, 2013(2): 171-176.
- [11] 辛兆强, 王海龙, 李斌. 关于直立式与斜坡式防波堤结构连接段防护处理问题的探讨[J]. *港工技术*, 2014, 51(2): 26-28.
XIN Z Q, WANG H L, LI B. Protective countermeasures to connecting sections of vertical and inclined breakwaters [J]. *Port engineering technology*, 2014, 51(2): 26-28.

- [12] 张超,郑祺文,宋育霖.斜向浪对直立与斜坡堤过渡段的影响研究[J].中国水运(下半月),2020,20(3):161-162.
ZHANG C, ZHENG Q W, SONG Y L. Study on the influence of oblique waves on the transition section between upright and sloping embankments [J]. China water transport, 2020, 20(3): 161-162.
- [13] 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室.深圳盐田港区东作业区集装箱码头工程一期工程局部护岸波浪整体物理模型试验报告[R].大连:大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室,2022.
State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology. Report on the physical model test of partial shore protection waves for phase 1 of the container terminal project at east operation area of Yantian Port [R]. Dalian: State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, 2022.
- [14] 交通运输部天津水运工程科学研究所.水运工程模拟试验技术规范:JTS/T 231—2021[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2021.
Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT. Technical code of modelling test for port and waterway engineering: JTS/T 231-2021 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.
- [15] 刘庄,王军,郭隆洽.斜坡式防波堤护面块体(ANTIFER)设计实例[J].水运工程,2019(9):150-154.
LIU Z, WANG J, GUO L Q. Case for the design of Antifer cube armor block [J]. Port & waterway engineering, 2019(9): 150-154.
- (本文编辑 王璁)
-
- (上接第163页)
- [4] 杜剑威,常媛.某水库工程上游围堰稳定计算及作用研究[J].城市建设理论研究(电子版),2024(25):124-126.
DU J W, CHANG Y. Study on the stability calculation and function of upstream embankment in a reservoir project[J]. Theoretical research on urban construction (electronic version), 2024(25): 124-126.
- [5] 吴罡,阮永芬,李鹏辉,等.极限平衡法与强度折减法在边坡稳定分析中的问题讨论[J].贵州大学学报(自然科学版),2024,41(5):70-77.
WU G, RUAN Y F, LI P H, et al. Discussion on the problems of limit equilibrium method and strength reduction method in slope stability analysis[J]. Journal of Guizhou University (natural science edition), 2024, 41(5): 70-77.
- [6] 中交天津港湾工程研究院有限公司.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,2018.
Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd. Code for foundation design on port and waterway engineering: JTS 147-2017 [S]. Beijing: Chian Communications Press Co., Ltd., 2018.
- [7] 龚晓南.地基处理手册[M].3版.北京:中国建筑工业出版社,2008.
GONG X N. Foundation treatment manual [M]. 3 ed. Beijing: China Architecture&Building Press, 2008.
- [8] 唐滢清.开挖换填在市政道路工程软基处理中的应用[J].江西建材,2021(7):179-180,182.
TANG Y Q. Application of excavation and replacement in soft foundation treatment of municipal road engineering[J]. Jiangxi building materials, 2021(7): 179-180, 182.
- [9] 孙红林.高速铁路软土路基地基处理与沉降控制探究[J].铁道建筑技术,2017(5):1-10.
SUN H L. Foundation treatment and settlement control research of high-speed railway subgrade with soft soil base [J]. Railway construction technology, 2017 (5): 1-10.
- [10] 广州大学.现浇泡沫轻质土技术规程:CECS 249:2008[S].北京:中国计划出版社,2008.
Guangzhou University. Technical specification for cast-in-situ foamed lightweight soil: CECS 249: 2008 [S]. Beijing: China Planning Press, 2008.
- [11] 陈立文.某码头护岸设计方案对比分析[J].珠江水运,2016(7):78-79.
CHEN L W. Comparative analysis of design schemes for the revetment behind the wharf [J]. Pearl River water transport, 2016(7): 78-79.
- (本文编辑 王传瑜)