

回淤淤泥特性试验研究

张乃受^{1,2}, 李一勇^{1,2}, 李增军^{1,2}, 胥新伟^{2,3}, 郑爱荣³

(1. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461; 2. 天津市水下隧道建设与运维技术企业重点实验室, 天津 300222; 3. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222)

摘要: 港珠澳大桥沉管隧道施工过程中受回淤影响, 制约了沉管安装的进度, 为此后期制定了严格的清淤标准。文章汇总淤泥特性的研究成果以及港珠澳大桥、深中通道回淤特性试验研究进展, 并以珠江口淤泥为试验原材, 展开回淤特性试验, 获得不同重度淤泥的物理特性及沉积特性, 同时通过设计的试验系统, 模拟沉管在回淤条件下的沉放过程, 获得了沉放过程中淤泥对沉放模型产生的影响, 在试验基础上提出沉管隧道碎石基床回淤特性的研究思路。

关键词: 沉管隧道; 回淤; 淤泥重度; 浮泥; 流泥

中图分类号: U655.54; TU411

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2020)05-0029-06

doi: 10.7640/zggwjs202005007

Experimental study on back-silting characteristics

ZHANG Nai-shou^{1,2}, LI Yi-yong^{1,2}, LI Zeng-jun^{1,2}, XU Xin-wei^{2,3}, ZHENG Ai-rong³

(1. CCCC First Harbour Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 2. Tianjin Enterprise-based Key Laboratory of Construction, Operation and Maintenance Technologies for Underwater Tunnels, Tianjin 300222, China; 3. CCCC Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: During the construction process of the Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge immersed tube tunnel, the process of the immersed tube installation was restricted by the back-silting, so strict desilting standard was established in the later stage. We summarized the research results of silting characteristics and the experimental study process of silting characteristics of Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge and Shenzhen-Zhongshan Bridge. Taking Pearl River Estuary silt as the test raw material, we carried out the back-silting characteristics test to obtain the physical characteristics and deposition characteristics of different heavy silt. At the same time, through the designed test system, the sinking process of immersed tube under the condition of back-silting was simulated, and the influence of silt on the sinking model was obtained. Based on the test result, a research approach about the back-silting characteristics of the gravel foundation bed of the immersed tube tunnel was proposed.

Key words: immersed tube tunnel; back-silting; unit weight of mud; floating mud; quick mud

0 引言

近年来以港珠澳大桥为代表的大型跨海沉管隧道建设技术在我国得到大幅度提升, 深中通道及大连湾海底隧道均开始进行沉管隧道的建设。受建设区域影响, 沉管隧道建设中均存在面临回淤问题较大可能性^[1], 特别是沉管隧道安放在新开挖的基槽内, 由于海底地形的变化导致基槽内的回淤有可能较其他位置回淤情况更为严重。

港珠澳大桥沉管施工期间先后多次受到回淤影响。E1管节安装时曾遭遇淤泥影响, 致使该管节安装持续进行了约96 h。E15管节由于回淤影响共进行了3次沉放安装才最终顺利完成。为此港珠澳大桥岛隧工程参考相关规范^[2-4]并结合工程经验, 制定了港珠澳大桥沉管隧道碎石垫层表面淤泥的清淤标准: 淤泥重度 12.6 kN/m³, 回淤厚度达到 4 cm; 淤泥重度 11.5 kN/m³, 回淤厚度达到 8 cm。

解决沉管隧道建设期间基槽的回淤是一个复杂的技术难题。本文针对沉管隧道的回淤现象展开了回淤淤泥沉积特性相关试验研究。

收稿日期: 2019-11-21 修回日期: 2020-02-20

作者简介: 张乃受 (1972—), 男, 河北衡水人, 工程硕士, 高级工程师, 从事工程技术管理工作。

E-mail: zhangnaishou@cccchyj.com

1 回淤淤泥的性状

1) 淤泥特性

我国重力式码头设计与施工规范^[5]条文说明中指出:淤泥性土中的淤泥具有结构强度、有附着力;流泥稍有结构强度,有附着力;浮泥则无结构强度、无附着力,因此浮泥对抛石基床不会形成夹层,可忽略其存在。含水率 $\omega < 150\%$ 的淤泥性土应加以限值,规定0.3 m的限值是实际经验而确定的。大量工程实例表明,厚度在此限值内的回淤沉积物不至于形成夹层,对工程的安全不会构成危害,可以不清。

2) 相关研究成果

流泥的含水率较大,土质松软,能够在重力作用下发生流动。中交天津港湾工程研究院曾针对我国沿海港口中黄骅港、深圳港、连云港港、天津港4个地区的代表性流泥进行室内试验分析,采用微型室内十字板淤泥剪切仪测试十字板抗剪强度与含水率的关系曲线。在室内试验条件下,当含水率不断增大,十字板抗剪强度趋近于0^[6]。十字板抗剪强度与含水率之间的关系曲线见图1。

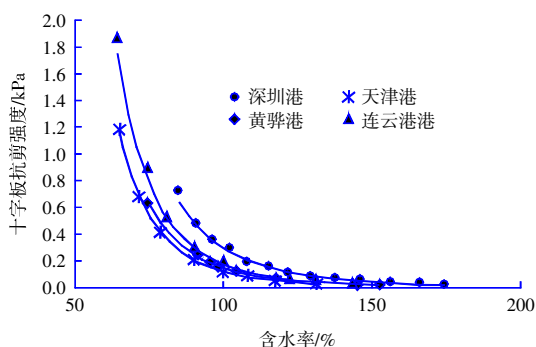


图1 4个港区的淤泥性土十字板抗剪强度随含水率变化

Fig. 1 Curve of silt soil vane shear strength in 4 port area changing along with water content

在港口工程关于适航水深的研究中提出了适航重度的概念^[7]。高频测深仪的反射淤泥重度约为 10.3 kN/m^3 ,其反射界面下仍存在一层满足船舶安全航行与停泊作业的小重度回淤层,衡量该层淤泥特性的参数有动力黏度 η 、含沙量 ρ 、重度 γ 。目前通常以淤泥重度作为衡量该层特性的主要指标,称之为适航重度。英国、泰国、荷兰、法国、委内瑞拉、印度等国的诸多港口确定的适航重度为 11.8 kN/m^3 ,比利时则不拉赫港设定的适航重度为 $11.3 \sim 12.3 \text{ kN/m}^3$ 。我国天津港适航水深主要

用于泊位,因此设定为 12.7 kN/m^3 ^[7-8]。港口工程中适航水深的研究与回淤对沉管对接的影响不相同,但港口工程关于适航重度的研究对于沉管基床回淤特性研究有重要的参考意义。

港珠澳大桥岛隧工程项目基于大量的试验研究,通过分析先铺碎石基床淤泥沉积规律及各影响因素的敏感性,明确先铺碎石基床内部淤泥的空间分布情况,揭示沉管隧道先铺碎石基床的纳淤机理,量化基于敏感参数指标的纳淤能力,首次对回淤环境的沉管隧道先铺碎石基床进行纳淤设计。

深中通道开展了现场回淤槽试验研究,通过在隧址区域开挖回淤坑的方式,获得了深中通道沉管隧道隧址区域的回淤速率以及回淤淤泥的物理指标。在无其他因素影响下试坑内的回淤速率约为 1.4 cm/d ;碎石基床上淤泥最大重度均小于 12.6 kN/m^3 ,平均重度基本在 $11.5 \sim 11.9 \text{ kN/m}^3$ 之间,碎石基床上重度大于 10.5 kN/m^3 的浮泥层厚度基本在 $0.1 \sim 0.3 \text{ m}$ 之间。回淤盒回淤物为粉砂质黏土,中值粒径介于 $0.003 \sim 0.005 \text{ mm}$ 之间,平均值为 0.004 mm ;黏土含量介于 $42.0\% \sim 59.8\%$ 之间,平均值为 50.5% 。

2 淤泥沉积特性试验研究

2.1 试验方法

以深中通道回淤淤泥为原材进行物理特性试验研究,试验方法如下:

配置重度为 13.0 kN/m^3 、 12.8 kN/m^3 、 12.6 kN/m^3 、 12.0 kN/m^3 、 11.5 kN/m^3 的混合物。将不同重度的拌合物灌注在5 L玻璃量筒中,每种重度灌注5只量筒中,共灌注30只量筒。以5 d为间隔时间,分别对经过模拟落淤过程的淤泥进行测量及取样。取样前测量淤泥以及水的分离界面变化,通过取样测量不同沉积深度处的淤泥重度并留取试样进行颗粒分析及含水率分析。

2.2 试验结果

2017年9月2日—10月3日进行了为期30 d的试验,以5 d时间为间隔,各取1只不同重度淤泥的量筒,以4 cm为分层标准,分别测量不同沉积厚度处的淤泥重度,共测得重度数据152组,留存样品进行重度、含水率及颗粒组成试验,用于对沉积淤泥进行分类。

1) 淤泥重度

不同重度淤泥在沉积过程中,随着沉积时间

的不断延长,沉积后的淤泥重度逐步增大,其中底部淤泥重度最大,表层淤泥重度最小。沉积淤泥各层重度随沉积时间增长变化曲线见图2(配置重度 12.0 kN/m^3)。

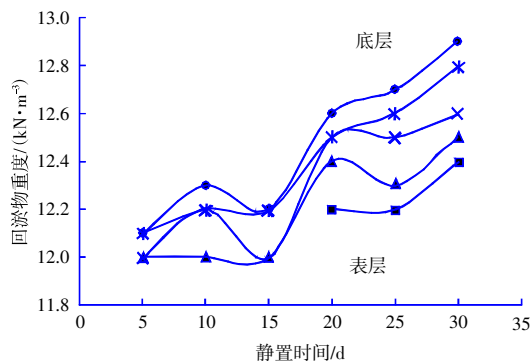


图2 淤泥重度随沉积时间变化曲线

Fig. 2 Curve of mud unit weight changing with deposition time

2) 淤泥含水率

淤泥含水率随着淤泥沉积深度的增加逐步减少。配置重度为 12.0 kN/m^3 、 12.8 kN/m^3 、淤泥含水率变化如下:配置重度 12.0 kN/m^3 的淤泥经过 15 d 的沉积后,20 cm 厚度范围内淤泥含水率 161%~182%,处于浮泥状态;配置重度 12.8 kN/m^3 经过 25 d 沉积后,沉积厚度 10 cm 以内的淤泥含水率 157%~179%,属浮泥状态,沉积厚度大于 10 cm 的淤泥含水率 120%~146%,属流泥状态。随着沉积时间的延长含水率随着淤泥沉积深度的增加逐步减少,逐渐从浮泥状态转变为流泥状态。淤泥含水率分布示意图见图3。

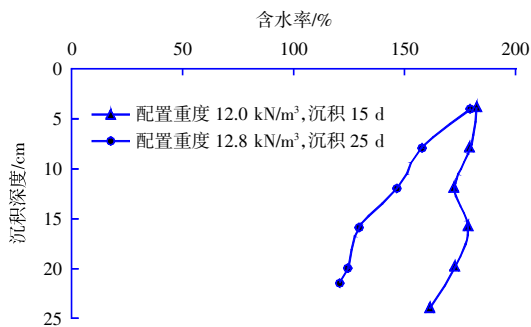


图3 淤泥含水率随沉积厚度分布

Fig. 3 Curve of water content changing with deposition thickness

3) 淤泥的颗粒组成

试验进行了 142 份试样,粒径中值范围为 $0.005 \sim 0.0073 \text{ mm}$,平均 0.0061 mm 。同时淤泥

沉积物的颗粒组成不随沉积深度的变化而有差异,淤泥颗粒组成随沉积深度变化曲线见图4(配置重度 12.8 kN/m^3 ,沉积 20 d)。

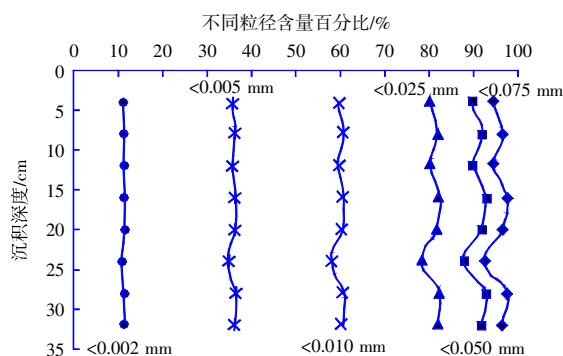


图4 淤泥颗粒组成随沉积深度分布

Fig. 4 Curve of median particle diameter changing with depth

3 小比尺模型试验

受试验条件限制,开展小比尺模型试验,模拟回淤状态下的沉管沉放过程。

3.1 试验系统组成

1) 试验槽

试验槽长 4.0 m,宽 1.5 m,试验槽一侧装有可供观察的玻璃窗。拟将试验槽利用玻璃板隔成 $3.0 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 的试验池,试验过程中可以实现 2 个方向上的水平透视。

2) 加载模型

加载模型尺寸长宽高为 $1500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,采用混凝土浇筑空心结构,通过向模型内注水调节加载模型重量。使加载模型在清水中始终保持 1.2 kPa 的荷载。经计算,试验模型在空气中重量为 3.15 kN ,水中调节重力为 0.9 kN 时,试验模型底部重力为 1.2 kPa 。

3) 试验沉放及测量系统

由试验加载系统及模拟试验池组成。试验加载控制系统通过电动葫芦及滑轮组组成,通过控制 2 台电动葫芦同步上升或下降实现加载模型的加载。加载速度控制在 0.2 m/min 。通过荷重传感器实时测量加载模型所受重力变化;通过拉线位移传感器实时测量加载模型的下放深度;通过视频记录加载模型下放过程中淤泥的变化;通过重度计测量淤泥的重度;通过标尺控制碎石、淤泥和清水的铺设厚度以及沉放后液面上涨量。试验系统如图5所示。

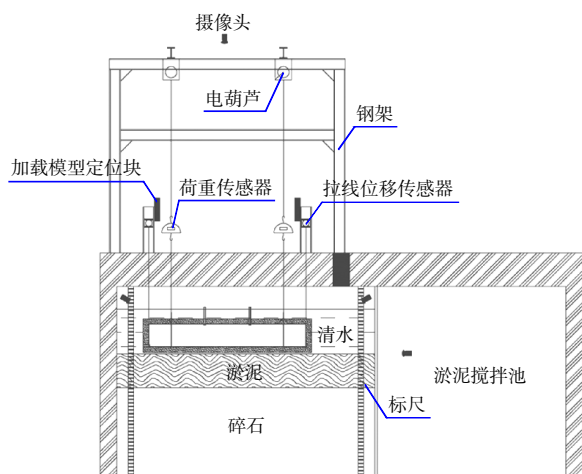


图5 试验模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of test model

4) 试验用碎石

碎石垫层参考港珠澳大桥沉管隧道碎石垫层进行布置，碎石垫层总厚 900 mm，无垄沟设置。碎石粒径范围 40~100 mm。碎石级配按表 1 要求进行配置，并最终记录碎石配比情况。

表 1 40~100 mm 碎石颗粒级配累计筛余率

Table 1 Weight of screen residue of gravel partical size 40~100 mm

公称粒径/mm	方孔筛/mm				
	31.5	37.5	63	75	90
40~100	100	95	30~60	0~10	0

%

3.2 试验过程

试验前首先铺设 900 mm 厚碎石，并进行整平及压实。将碎石表面在试验池壁上进行标记，然后灌注清水至碎石表面并静置；通过往试验模型内灌水的方式调整加载模型的重力，在水中使其底部的荷载值可以达到 1.2 kPa 级别（相当于港珠澳大桥沉管安装船提供 8 000 kN 的负浮力产生的管底荷载）；依据加载模型的限位装置多次下放试验模型，并读取拉线位移传感器数值。直至传感器读数不再发生变化后，将最后的读数值记录作为初始值；将配置好特定重度的淤泥缓慢灌注至试验槽内，初次灌注时，淤泥会逐步沉入碎石垫层的空隙内，当碎石垫层内空隙填充饱满后淤泥面会随着灌注量的增加而增长，直至灌注淤泥达到 20 cm 厚；再沿池壁向池内灌注清水 40 cm，过程中保持缓慢均匀，尽可能减少对淤泥层的扰动；将加载模型缓慢下沉至试验池内的淤泥层中，下

放过程中实时记录吊力的变化，并进行视频记录，待加载模型稳定后读取拉线位移传感器最终数值并记录。将拉线位移传感器读数与初始值进行比较，从而判断试验模型与碎石垫层表面是否存在夹泥现象以及夹泥厚度。试验完成后，清除试验池中淤泥及清水，并配置另外重度淤泥重复试验过程。

3.3 试验结果

1) 沉放深度

试验分别配置 11.5~14.5 kN/m³ 共 13 种不同重度的淤泥。并在该条件下进行沉放试验。

通过试验可知，当淤泥重度 ≤ 12.6 kN/m³，同时淤泥厚度 ≤ 20 cm，试验模型在 1.2 kPa 及 1.8 kPa 荷载级别下进行沉放时，淤泥均可顺利排出，碎石基床与加载模型之间不会出现夹泥现象。试验结果统计见图 6。

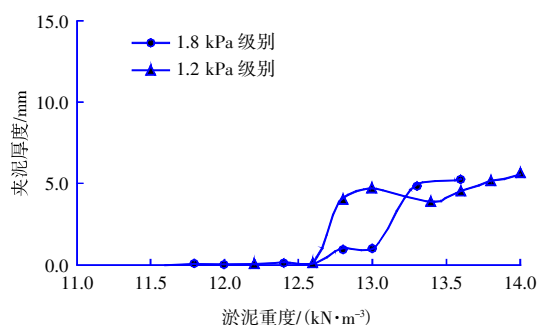


图6 试验模型与碎石基床间夹泥厚度

Fig. 6 Thickness of mud between test model and gravel foundation bed

淤泥重度大于 12.6 kN/m³，厚度为 20 cm 时，试验模型与碎石垫层间会出现夹泥现象，且随着淤泥重度的增大，夹泥厚度也逐渐变厚。但随着沉管荷载的增加，淤泥会继续排出，夹泥厚度会降低。

2) 淤泥的附着力

在加载模型提升过程中，不同重度的淤泥对模型产生的附着力略有不同。随着淤泥重度的增大，淤泥附着力略有增长。附着力变化范围在 0.07~0.31 kPa 范围内。试验过程中 2 个吊点吊力变化曲线见图 7。

3) 模拟沉放过程中的现象

试验模型沉放中，下放速度控制在 0.2 m/min。淤泥与上部清水界面清晰，随着模型的缓慢下放，逐步沉入淤泥层，淤泥迅速从模型底部挤出，清

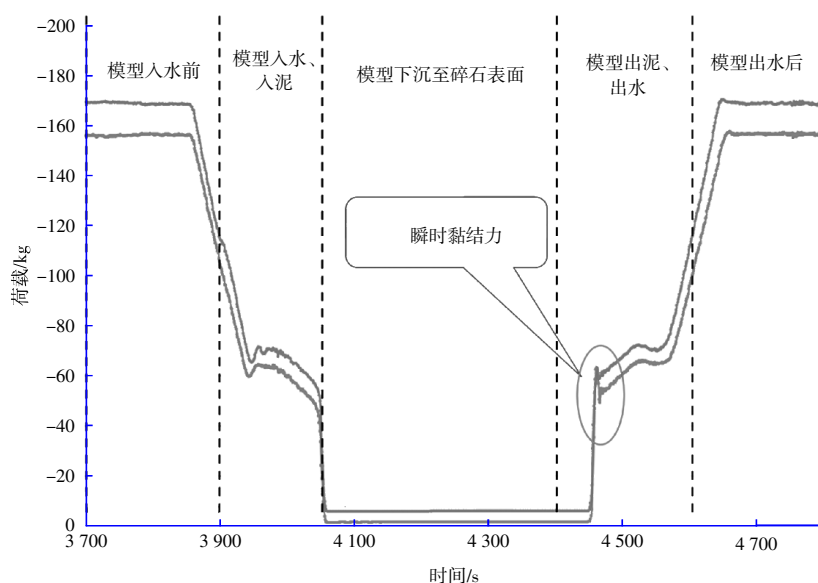


图7 吊力变化曲线

Fig. 7 Changing curve of lifting force

水迅速浑浊。由于试验池尺寸限制,淤泥自加载模型底部排出后沿试验池壁继续扩散直至整个试验池内,造成可视度下降。下放过程中并未发现模型姿态存在较大异常。

4 总结及展望

本文通过试验获得回淤淤泥的沉积特性,随着沉积时间的增加,沉积淤泥的重度随着沉积深度的增加而增长,回淤淤泥的颗粒组成不随深度的增加而变化。同时重度超过 12.6 kN/m^3 的淤泥在沉管模拟试验过程中在碎石基床与模型之间产生了夹泥现象。受试验条件的限制,小比尺模型试验与沉管结构相比,尺寸相差较大,其试验结论尚不能直接应用到实际工程中,还需要有针对性地进行大比尺模型试验。

从淤泥的定义分析,碎石基床顶部淤泥特性的判断有着极为重要的意义。若碎石基床顶部淤泥为浮泥,则不会对沉管的沉放产生影响。如为流泥及浮泥,则在沉管沉放的过程中会对管节有一定程度的影响,同时由于沉放过程的扰动,流泥也有转化为浮泥的可能性。影响沉管沉放对接的淤泥重度临界点仍需要深入研究,应在以下方面开展研究:

1) 研发淤泥原位测试设备

针对大型跨海沉管隧道回淤特性的研究目前尚无特别有效的试验方法和测试手段,现场回淤监测多采用在水下放置回淤盒,通过潜水员定期回收的方式对淤泥展开试验^[9-10]。在操作过程中淤

泥受到人为扰动,导致试验数据并不能完全真实反应碎石基床顶面淤泥特性。未来应着手研发水下淤泥原位测试技术,从取样试验改为现场原位监测,获得回淤淤泥重度、含水率、颗粒组成等参数沿回淤厚度方向的分布,掌握淤泥的特性,准确对其分类。

2) 研究碎石基床顶面淤泥分布特征

碎石基床面积巨大,且位于开挖好的基槽内,受涨落潮及水流方向、回淤来源等诸多因素的影响,碎石基床表面的回淤厚度分布情况尚不可知。除通过水下原位测试技术获取基槽内回淤物的物理特性外,还需要布置较多的测点获得基槽内淤泥的分布特性。

3) 研究淤泥对沉管沉放的影响

沉管管节底面积巨大,在回淤状态下沉管与淤泥间的相互作用尚不完全清晰,通过大比尺模型试验,模拟现场回淤状况下的沉管沉放对接,获取能够对沉管沉放对接产生不利影响的临界状态的淤泥特性,确定更加合理的清淤标准。

4) 研究防淤、清淤技术

在掌握淤泥特性及对沉管影响的基础上继续研究防淤、清淤技术及装备。实现回淤有监测,克服回淤有能力,防淤、清淤有手段的成套技术。

参考文献:

- [1] 何杰,辛文杰. 港珠澳大桥沉管隧道基槽异常回淤分析与数值模拟[J]. 水科学进展, 2019, 30(6): 823-833.

HE Jie, XIN Wen-jie. Analysis and numerical simulation of abnor-

- mal siltation in foundation trench of immersed tube tunnel of Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(6): 823-833.
- [2] JTJ 167-2—2009, 重力式码头设计与施工规范[S].
JTJ 167-2—2009, Design and construction code for gravity quay [S].
- [3] JTS 257—2008, 水运工程质量检验标准[S].
JTS 257—2008, Standard for quality inspection of port and waterway engineering construction[S].
- [4] JTS 133—2013, 水运工程岩土勘察规范[S].
JTS 133—2013, Code for geotechnical investigation on port and waterway engineering[S].
- [5] JTS 167-2—2009, 重力式码头设计与施工规范[S].
JTS 167-2—2009, Design and construction code for gravity quay [S].
- [6] 梁爱华, 孙万禾, 刘爱民, 等. 流泥的工程特性分析研究[J]. 中国港湾建设, 2011(3): 1-4.
LIANG Ai-hua, SUN Wan-he, LIU Ai-min, et al. Analysis on engineering characteristics of quick mud[J]. *China Harbour Engineering*, 2011(3): 1-4.
- [7] 庞启秀, 杨树森, 杨华, 等. 淤泥质港口适航水深技术研究与应用[J]. 水利水运工程学报, 2010(3): 33-39.
PANG Qi-xiu, YANG Shu-sen, YANG Hua, et al. Research and application of the technique of nautical depth in muddy harbors[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2010(3): 33-39.
- [8] JTJ/T 325—2006, 淤泥质海港适航水深应用技术规范[S].
JTJ/T 325—2006, Code for nautical depth in muddy harbors[S].
- [9] 郑伟. 港珠澳大桥沉管隧道深基槽回淤监测与分析[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(11): 25-28, 55.
ZHENG Wei. Back silting monitoring and analysis of deep foundation trench in the Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge immersed tunnel project[J]. *China Harbour Engineering*, 2015, 35(11): 25-28, 55.
- [10] 杨华, 王汝凯, 韩西军, 等. 港珠澳大桥沉管隧道基槽泥沙回淤研究总述及创新实践[J]. 水道港口, 2018, 39(2): 125-132.
YANG Hua, WANG Ru-kai, HAN Xi-jun, et al. Overview of sedimentation research and innovative practice to the Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge tunnel trench[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2018, 39(2): 125-132.

(上接第10页)

此导致在波浪力计算过程中荷载作用高度往往会超过防浪墙的顶标高, 本文建议当波浪爬高超过防浪墙顶高程时, 实际计算中取防浪墙顶高程作为波浪力作用的最高点。此外, 从物模试验结果可以明显看出防浪墙前的护面块体对于防浪墙有一定的掩护作用, 在根据彼得森公式进行防浪墙断面尺寸确定时, 有护面块体掩护位置的波浪力可适当进行折减, 避免造成设计浪费。

中外规范防浪墙波浪力计算公式基本都是通过对典型条件下的模型试验研究结果总结得到的经验公式, 对于中长周期波浪作用下的防浪墙, 此类计算公式计算所得结果与实际模型试验结果存在较为显著的偏差, 因此, 在项目施工图设计阶段, 设计人员按照规范公式拟定防浪墙断面后, 采用物模试验进行验证是十分必要的。

参考文献:

- [1] JTS 154—2018, 防波堤与护岸设计规范[S].
JTS 154—2018, Code of design for breakwaters and revetments[S].
- [2] JTS 145—2015, 港口与航道水文规范[S].
JTS 145—2015, Code of hydrology for harbour and waterways[S].
- [3] BS 6349-7: 1991, Maritime structures-Part 7: Guide to the design and construction of breakwaters[S].
- [4] U.S. Army Corps of Engineers. Coastal engineering manual (EM 1110-2-1100)[M]. 2006.
- [5] 姜宁林, 王君辉, 李存兴. 中长周期波作用下防波堤导航灯基础波浪力计算方法[J]. 水运工程, 2018(12): 82-87.
JIANG Ning-lin, WANG Jun-hui, LI Cun-xing. Wave force calculation method for breakwater beacon foundation under action of medium-long period wave[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2018(12): 82-87.
- [6] 于定勇, 苏耀. 深水斜坡堤胸墙波浪力计算方法研究[J]. 中国海洋大学学报, 2012, 42(1-2): 136-140.
YU Ding-Yong, SU Yao. Study on calculation method for wave loads on deep water breakwater crown wall[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2012, 42(1-2): 136-140.
- [7] 苏耀, 曲艺, 朱韶辉, 等. 深水斜坡堤胸墙波浪力研究进展[J]. 海岸工程, 2011, 30(3): 43-48.
SU Yao, QU Yi, ZHU Shao-hui, et al. Progress in methods for calculation wave loads on breakwater crown wall in deep water[J]. *Coastal Engineering*, 2011, 30(3): 43-48.
- [8] 李雪艳, 付聪, 范庆来, 等. 斜坡堤典型胸墙波浪力的影响因素[J]. 海洋科学, 2015, 39(12): 118-129.
LI Xue-yan, FU Cong, FAN Qing-lai, et al. Factors influencing wave load on typical crest walls of sloping breakwaters[J]. *Marine Sciences*, 2015, 39(12): 118-129.
- [9] 琚烈红. 斜坡堤防浪墙型式合理性试验研究[J]. 水运工程, 2006(5): 1-3, 7.
JU Lie-hong. Experimental research on rationality of wave screen types of sloping breakwaters[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2006(5): 1-3, 7.
- [10] 李景辉, 姚颖, 张文忠, 等. 斜坡式海堤挡浪墙稳定性试验研究[J]. 中国港湾建设, 2012(4): 69-71.
LI Jing-hui, YAO Hao, ZHANG Wen-zhong, et al. Experimental study on stability of wave wall of rubble mound breakwater[J]. *China Harbour Engineering*, 2012(4): 69-71.