



水下基槽回淤沉积物厚度检测方法探讨

刘吉福^{1,2}

(1. 中国铁建港航局集团有限公司, 广东 珠海 519000;

2. 中铁建港航局集团勘察设计院有限公司, 广东 广州 511442)

摘要: 水下基槽回淤沉积物厚度过大时会增大沉降, 甚至可能导致地基失稳事故。相关规范对水下基槽回淤沉积物厚度检测没有规定具体检测方法, 工程实践中采用的回淤沉积物厚度检测方法五花八门, 有些检测方法存在较多偏差甚至是错误方法。在分析浮泥和回淤沉积物差别的基础上, 对回淤沉积物厚度检测方法进行分类、介绍和评价, 最后通过一个工程实例说明区分浮泥与回淤沉积物、合理选择回淤沉积物厚度检测方法的重要性。

关键词: 基槽; 回淤沉积物; 浮泥

中图分类号: TU 195

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)06-0029-006

Detection methods for thickness of siltation deposit of trench under water

LIU Ji-fu

(1. CRCC Harbour & Channel Engineering Group Co., Ltd., Zhuhai 519000, China;

2. CRCC Harbor & Channel Engineering Group Survey and Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 511442, China)

Abstract: Too thick siltation deposit of foundation trench under water may cause more settlement and even slide of ground. No detection methods for thickness of siltation deposit are proposed by present codes. Many kinds of detection methods are used for engineering and some methods are improper. Basing on distinguishing siltation deposit from fluid mud, the present possible detection methods are sorted, introduced simply and evaluated. Finally, the importance of distinguishing siltation deposit from fluid mud and choosing proper detection method is pointed out through a project.

Key words: foundation trench; siltation deposit; fluid mud

在港口与航道工程中, 重力式码头施工时需要挖除软弱土层、形成水下基槽, 然后在基槽中抛填基床或抛石换填^[1-2], 沉管隧道也需要开挖水下基槽并抛石换填或找平^[3-6], 有些海边或海中机场跑道对软弱地基采用换填处理时也需要开挖水下基槽和抛填^[7]。

由于基槽开挖与抛填总是存在一定时间间隔, 基槽内不可避免地发生一定数量的回淤, 当基槽很深、淤积严重或基槽边坡开挖成阶梯状时, 则更容易在基槽底面形成回淤沉积物^[2,5,8]。

按照JTS 167-2—2009《重力式码头设计与施工规范》, 施工基床前需要检测密度大于 $1\,260\text{ kg/m}^3$ 或含水率小于150%的回淤沉积物的厚度, 如果回淤沉积物厚度大于设计要求, 则需要进行清淤^[1]。其他工程的水下基槽也往往有类似的要求^[3]。

现有相关规范中仅提出对回淤沉积物厚度的检测要求, 但是没有明确检测方法; 工程实践中对回淤沉积物厚度的检测方法各式各样, 存在较多争议, 甚至错误地按照浮泥厚度检测方法进行检测。

收稿日期: 2012-11-08

作者简介: 刘吉福(1971—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事港口与航道、公路等施工、科研等工作。

1 回淤沉积物的含义

在工程实践中,经常将回淤沉积物厚度简称为回淤厚度,从而容易导致将浮泥与回淤泥沉降物混淆起来,进而导致采用错误的检测手段检测回淤沉积物厚度。

水下基槽中物质沿深度的密度剖面如图1所示。其中密度大于 $1\ 260\text{ kg/m}^3$ 或含水率小于150%的泥浆接近于吹填淤泥形成陆地时落淤1~2个月时的泥浆,称为回淤沉积物;位于回淤沉积物之上,密度介于 $1\ 050\sim 1\ 260\text{ kg/m}^3$ 的泥浆称为浮泥。浮泥是没有强度和附着力的泥浆,属于液体范畴,不能称之为土;而回淤沉积物则属于淤泥性土^[9-11]。

回淤沉积物属于土的范畴,基床或换填材料中含有过多的回淤沉积物会增大含泥量、降低内抗剪强度,增大压缩性,从而增大沉降量、降低稳定性。因此应重视回淤沉积物厚度的检测。

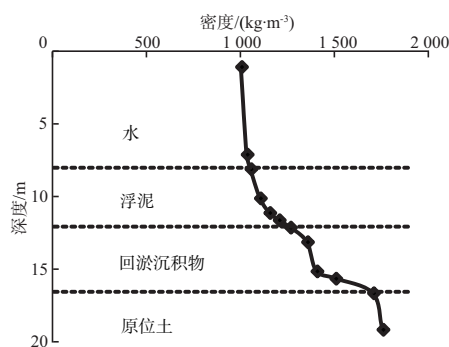


图1 密度-深度剖面

2 现有检测方法

根据回淤沉积物的定义,可将水下基槽回淤沉积物厚度检测方法归纳为高差法、取样测厚度法、取样测密度法、密度剖面图法4大类。

2.1 高差法

高差法假设基槽开挖完毕时基槽底没有密度大于 $1\ 260\text{ kg/m}^3$ 的残积物,分别在基槽开挖完毕时、下一工序施工前测量基回淤沉积物顶面高程,两者之差即为回淤沉积物厚度。常用测量仪器有水砣和测深仪。

2.1.1 水砣

利用水砣(通常平面尺寸为 $20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$,质量为 5 kg ,钢丝直径通常为 2 mm)测量水深,

换算后得到回淤沉积物顶面高程。由于水砣多是自行制作,测量误差较大;三爪砣测量的界面密度值为 $1\ 285\text{ kg/m}^3$ ^[12],利用其测定的回淤沉积层厚度偏小。如果基槽开挖时由于清底不彻底而导致基槽内有沉积物,则测量结果更加偏小。

2.1.2 测深仪

单频测深仪和双频测深仪高频反射界面浮泥密度多为 $1\ 050\text{ kg/m}^3$ ^[13-15];低频反射界面密度多为 $1\ 245\sim 1\ 300\text{ kg/m}^3$ ^[16-17],因此利用单频测深仪和双频测深仪的高频测试得到的是浮泥的顶面高程,利用双频测深仪低频测试得到的深度接近浮泥底面高程,也是回淤沉积物的顶面高程。因此利用双频测深仪的低频在基槽开挖前和抛填前分别测试回淤沉积物的顶面高程,两者之差便是回淤沉积物的厚度。当然,这种方法的前提是基槽开挖完毕时基槽底面没有密度大于 $1\ 260\text{ kg/m}^3$ 的残积物。

试验表明,由于双频测深仪低频穿透能力有限,如果浮泥浓度或厚度较大,低频反射面密度有可能小于 $1\ 200\text{ kg/m}^3$ ^[17],导致检测准确性降低。另外,受波浪、水位、声波波长等因素影响,双频测深仪低频测试的精度通常在 10 cm 左右^[18],相对回淤沉积物厚度要求(通常小于 3 cm)而言精度较低。如果基槽开挖完毕时由于清底不彻底导致基槽内有沉积物时,则检测误差更大。

2.2 取样测厚度法

利用工具取出基槽内部分浮泥、淤泥性土及部分地基土,测量得到回淤沉积物厚度。目前采用的水下取样的设备有竹竿和封闭旋进取泥器。

2.2.1 竹竿

将竹竿插入基底一定深度后提出水面,现场打开竹竿,测定不流动的回淤沉积物厚度,以其厚度作为回淤厚度^[2]。

抛填基床或回填料与基槽开挖的间隔时间通常小于1个月,因此回淤沉积物厚度检测时回淤时间通常小于1个月。吹填淤泥落淤试验表明,落淤后1个月范围内的淤泥含水率和孔隙比变化很小,泥浆含水率约为130%~160%,呈流动状态。相关规范也指出流泥(含水率85%~150%)强度很低,为流动状态^[10]。因此采用竹竿取样法测定回淤沉

积物厚度，打开竹竿时，部分回淤沉积物必然流失，导致测定的厚度不准确，通常偏小。

2.2.2 封闭旋进取泥器^[7]

也称护筒螺旋取土器^[19]，该仪器在深圳机场扩建工程中研制成功并应用。封闭旋进取泥器是在螺旋钻头外侧设置一个护套（图2）。螺旋钻头直径为85 mm，长度为500 mm；护套直径为100 mm，长度为550 mm。

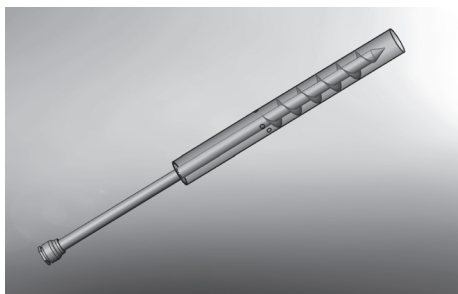


图2 封闭旋进取泥器

螺旋钻头与钢杆连接，护套可以沿钢杆滑动，钢杆长度按水深状况进行驳接。利用钢杆将护筒螺旋取土器竖立于基槽底面，采用人工旋转钢杆，使螺旋钻头伸出护套并钻进土层中，护套则停留在基槽底面。钻至要求深度后，向上提升螺旋钻头回到钢护套内（图3）。为了保证螺旋钻头顺利退回护套内，钻土时应保持部分螺旋钻头在护套内。在护套的保护下，从水中提出取土器。该方法可以检测基底土质、基底漏挖软土厚度，用于测定回淤沉积物厚度时，则与竹竿法类似，由于打开护套时部分回淤沉积物流失，导致测定的回淤沉积物厚度不准确，通常偏小。

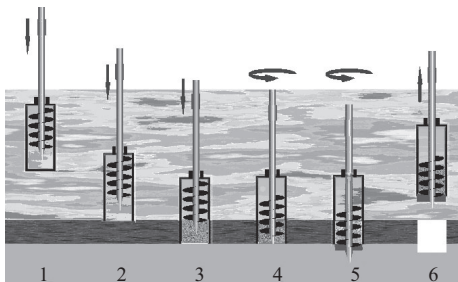


图3 封闭旋进取泥器取泥过程

2.3 取样测重度法

由于基槽中从上向下依次为清水、浑水、浮泥、流泥，其重度自上而下逐渐增大，因此可以

利用一个容器取出基底+设计回淤沉积物厚度处的泥浆，然后检测其密度，如果该处泥浆的密度小于 $1\,260\text{ kg/m}^3$ ，则说明回淤沉积层厚度小于设计厚度；如果该处泥浆的密度大于 $1\,260\text{ kg/m}^3$ ，则说明回淤沉积层厚度大于设计厚度。

2.3.1 潜水员+容器

潜水员下潜到基底，在基底以上设计回淤沉积物厚度处利用容器取样，测定其密度^[2,20]。

2.3.2 悬移质取样器

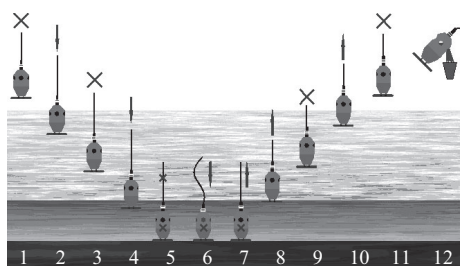
悬移质取样器能在垂直高度1 m范围内分5层，获取海底浮泥状样本。由取样器芯与外罩壳组成，取样器芯由导向块、连接板、钢丝连接座、采样芯、区间密封圈、采样芯底座、底座密封圈装配构成；采样芯成空格状圆筒筐形，采样芯中间有多层区隔板将采样芯分成多个区间，在区隔板所在位置的采样芯外侧装有区间密封圈，采样芯下端装采样芯底座；外罩壳由外罩筒、外罩壳顶板、密封连接圈构成；外罩筒成圆筒状，外罩筒上设置多个安装旋塞的放水口；外罩壳密封连接圈焊接在外罩筒下端，外罩壳下降到采样芯底座后，采样芯底座与外罩壳的密封连接圈合拢密封^[21]。

该仪器采取对象主要为悬移质，当然也可以用于回淤沉积物的采取。由于利用绳索下放仪器，用于测定回淤沉积物厚度时需要确定是否能下放到回淤沉积物底面，以及每层取样代表的泥浆密度层面与放水口位置的关系。

2.3.3 潜底定位取浆器

该仪器在深圳机场扩建工程中研制成功并应用。潜底定位取浆器外形为橄榄流线型，底部有可调节高度支架，总质量约6 kg。潜底定位取浆器外壳由上壳、下壳两部分构成，上壳上开有进浆口。上壳内设有阀门，阀门由设在上壳内壁上的内圆锥形阀座和圆锥形阀芯构成，阀芯上端连接有阀杆，阀杆顶部连接有绳索。通过绳索将潜底定位取浆器下放至预定位置，继续下放绳索，内置阀芯依靠自重打开，取浆完成后，上提绳索，阀芯先关闭，再上升，直到提出水面（图4）^[7]。

其缺点是由于采用绳索下放仪器，难以确定是否能下放到回淤沉积物底面仪器易倾倒，也不



注: 1. 陆上静止; 2. 陆上下放; 3. 水中下放; 4. 水中静止; 5. 水中到底; 6. 打开阀芯; 7. 关闭阀芯; 8. 关闭静止; 9. 水中上提; 10. 出水上提; 11. 出水静止; 12. 检测。

图4 潜底定位取浆器检测过程

能确定其所取的浆是否代表规定厚度处的泥浆密度。

2.3.4 浮泥提取器

该仪器在深圳机场扩建工程中研制成功并应用。浮泥提取器是一个圆柱形密封容器，侧面中部开设2个窗口，窗口可以通过机械结构在水面以上开关（图5）。

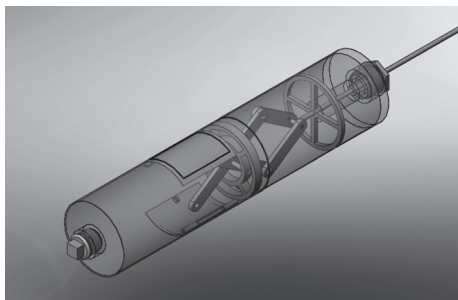


图5 浮泥提取器效果图

圆柱形密封容器长约400 mm，直径约100 mm，窗口离容器底部约100 mm。连接套管根据水深进行驳接。首先在密封的状态下通过套管置于水下基槽底部，拉套管中6 mm直径的不锈钢芯杆把窗口打开，浮泥在液体压力下进入并灌满容器；然后压芯杆关闭窗口，在提出水面过程中浮泥不会流出^[22]。

其缺点是保持窗口关闭的难度较大，水深较大时需要依靠芯杆自重保持窗口关闭；也不能确定其所取的浆是否代表规定厚度处的泥浆密度。

2.4 密度剖面图法

密度剖面法是利用密度计测试得到基槽内的密度-深度剖面图，然后按照回淤沉积物的定义得到回淤沉积物厚度。可以获得密度-深度剖面图的仪器有

γ 射线密度仪、音叉密度仪和超声波重度仪等。

2.4.1 γ 射线密度仪

γ 射线密度仪由探头和记录仪器两部分组成，探头采用双管式结构，探头由放射源和NaI（T1）闪烁晶体探测器组成透射法结构形式，一个管内装放射源，另一个管内装闪烁探测器（图6）。

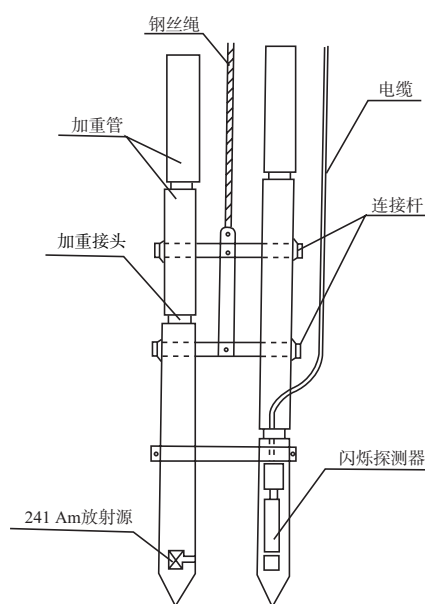


图6 γ 射线密度仪探头

当 γ 射线穿过浮泥或淤泥性土时，其强度随浮泥或淤泥性土的密度增大而呈指数规律递减，并通过室内标定可确定射线强度与浮泥或淤泥性土密度的相关性。利用这一原理可测试不同深度处的浮泥或淤泥性土的密度，从而得到密度剖面图，进而得到回淤沉积物厚度^[2,5,23]。 γ 射线密度仪的密度测量范围通常为1 000~1 700 kg/m³，测量误差为 ± 3.1 kg/m³^[5]。因此， γ 射线密度仪可以测试水、浮泥、回淤沉积物、原状土等物质的密度。

γ 射线密度仪的缺点是操作不方便，且具有放射性。

2.4.2 音叉密度计

音叉密度计是音叉振动密度计的简称。在电子电源的控制下，音叉的一条腿以一定频率振动，另外一条腿则会产生谐振，谐振可以被测量记录，得到谐振频率和电压值。因为谐振频率和电压值与所插入的介质的流变特性和密度有关，

所以对谐振频率和电压值进行分析计算就可得到介质的流变特性和密度值。Densitune音叉密度计密度测试误差<测量值的1%，密度量程为1 000~1 800 kg/m³，水下深度量程为0~60 m，深度测量误差<测量值的0.15%^[5,17,21]。因此，利用音叉密度计可以测试得到包括水、浮泥、回淤沉积物、原状土等物质在内的密度-深度剖面图，从而得到回淤沉积物厚度。

2.4.3 超声波重度仪

该仪器由中国科学院东海研究站研制。当浮泥浓度大于10 g/m³时，超声波衰减系数与浓度

成正比，利用这一原理制成超声波泥浆密度测量仪。利用该仪器可以同时测试得到泥浆的密度和深度，从而得到密度-深度剖面图，进而得到密度大于1 260 kg/m³的回淤沉积物厚度。

由于声发射换能器的辐射阻抗在清水中和不同浓度的泥浆中有变化，使得辐射声功率有变化，从而影响声衰减的测量精度，用于密度大于1 500 kg/m³的淤泥性土时测试结果偏大^[24]。因此，利用该方法测试的回淤沉积物厚度偏小。

2.5 各种检测方法的缺点

各种检测方法的缺点见表1。

表1 回淤沉积物厚度检测方法缺点

方法	测试仪器	缺点
高差法	水砣	不能考虑初始沉积物，水砣制作随意性大
	双频测深仪	不能考虑初始沉积物，测量精度低
取样	竹竿	测试值偏小
测厚度法	封闭旋进取泥器	测试值偏小
取样 测密度法	潜水员	扰动大，取样代表性差
	悬移质取样器	需要确定是否能下放到回淤沉积物底面，每层取样代表的泥浆密度层面与放水口位置的关系。
	潜底定位取浆器	难以确定是否能下放到回淤沉积物底面，仪器易倾倒不能确定其所取的浆是否代表规定厚度处的泥浆密度。
密度 剖面图法	浮泥提取器	保持窗口关闭的难度较大，也不能保证其所取的浆是否代表规定厚度处的泥浆密度。
	γ射线密度仪	操作不便，有辐射，成本高
	音叉密度计	成本高
	超声波重度仪	测试值偏小

3 实例分析

深圳机场扩建陆域形成及软基处理工程场地位于现有机场围界西海堤的西侧。扩建项目中的机场第二条跑道，长约4 000 m，宽79 m，跑道南北走向偏西约38°。深圳机场二跑道在水深5 m、海底天然淤泥厚度为5~9 m的地基上建造，考虑到工程的重要性及对地基土强度、变形稳定性的要求，将跑道及相关范围淤泥全部清除，然后再吹填中粗砂。为保证置换的彻底并满足工程要求，设计要求浮泥厚度不得大于30 cm，且浮泥密度不大于1 250 kg/m³。

虽然猜测设计人员将浮泥与回淤沉积物混淆了，但是咨询设计单位总工仍明确设计要求：1) 必须彻底挖除淤泥，即基底土必须是下卧硬黏土；2) 回淤形成的泥浆密度不得大于1 250 kg/m³，且浮泥厚度不得大于30 cm。即不得有回淤沉积物。虽然该设计要求过于苛刻，但为满足设计要求，应采用封闭旋进取泥器或

水上钻探等方法检查基底是否是硬黏土，采用音叉振动密度计或γ射线密度仪检测回淤沉积物厚度是否为零，采用双频测深仪检测浮泥厚度是否小于30 cm。当然，浮泥厚度也可以采用密度剖面图法得到。

本工程实际的检测方法为：各个标段采用潜底定位取浆器检测基槽底30 cm厚浮泥密度是否小于1 250 kg/m³；采用封闭旋进取泥器取出基槽底沉积物，打开护筒测量沉积物厚度是否小于30 cm。很明显，即使潜底定位取浆器检测的基槽底30 cm厚浮泥的密度小于1 250 kg/m³时，也不能说明浮泥厚度小于30 cm；而封闭旋进取泥器测量的基槽底沉积物厚度偏小。本工程的检测与设计意图存在一定差距的，导致这种情况的主要原因是对浮泥和回淤沉积物的概念混淆了。

4 结论

1) 应正确认识浮泥和回淤沉积物的区别，并

回淤沉积物的特点选择合适的检测方法。

2) 利用 γ 射线密度仪或音叉振动密度计的密度剖面图法是目前能够较准确检测回淤沉积物厚度的方法。

3) 研究在回淤沉积物厚度处准确取样的仪器是一种发展方向。

参考文献:

- [1] JTS 167-2—2009 重力式码头设计与施工规范[S].
- [2] 张伟, 朱继伟. 深基槽清淤验收方法的探讨[J]. 水运工程, 2006(11): 38-42.
- [3] 陈韶章. 沉管隧道设计与施工[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [4] 沈永芳, 吴刚, 赵强. 广州仑头-生物岛隧道工程基槽的水下检测[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(5): 983-988.
- [5] 王照田. 浮泥观测在港珠澳大桥试挖槽中的应用[J]. 人民珠江, 2010(5): 7-9.
- [6] 高耿明, 潘润秋. 基于多波束测深的海底沉管基槽回淤监测与分析[J]. 测绘信息与工程, 2010, 35(4): 32-33.
- [7] 薛文鼎, 马文东. 水下清淤取样检测器具的研究与应用[J]. 中国港湾建设, 2009(6): 35-38.
- [8] 傅智伟. 沉管隧道基槽开挖基设备[J]. 世界隧道, 2000(6): 14-16.
- [9] JTS 147-1—2010 港口工程地基规范[S].
- [10] JTS 133-1—2010 港口岩土工程勘察规范[S].
- [11] JTS 133-3—2010 航道工程地质勘察规范[S].
- [12] 牛桂芝, 裴文斌. 三爪砣测量适航水深技术分析对策[J]. 水道港口, 2006, 27(4): 265-268.
- [13] JTJ 203—2001 水运工程测量规范[S].
- [14] 交通部《水运工程测量手册》编写组. 水运工程测量手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [15] 薛元忠, 何青, 李茂田, 等. 长江口新浏河冲淤变化监测及定量分析[J]. 泥沙研究, 2004(6): 16-21.
- [16] 张俊, 顾亚平, 查雨, 等. 双频测深仪对淤泥层测定的研究[J]. 仪器仪表学报, 2002(Z2): 492-493.
- [17] 冯俊. 浮泥发育时双频回声测深误差及其对适航水深监测的影响[J]. 水运工程, 2011(8): 83-87.
- [18] 陈宝. 长江口深水航道浮泥观测初探[C]//中国航海学会航标专业委员会测绘学组2008年学术研讨会.
- [19] 宋钢贤. 护筒螺旋取土器: 中国, ZL2009 9 0057747.5[P]. 2010-03.
- [20] 李宏升, 张刚, 方耀卿. 重力式码头过大位移和不均匀沉降质量通病防治[J]. 海岸工程, 2009, 28(3): 49-57.
- [21] 王志东. Silas和Densitune系统在航道工程中的应用[J]. 港工技术, 2011, 48(1): 51-53.
- [22] 宋钢贤. 浮泥提取器: 中国, ZL2009 1 0039947.2[P]. 2009-09.
- [23] 李樟苏, 吴永进. γ 密度仪测定杭州湾浮泥和淤泥重度简介[J]. 水运工程, 1995(5): 17-20.
- [24] 钱炳兴, 凌鸿烈, 孙跃秋, 等. 超声波浮泥重度测量仪[J]. 声学技术, 2001, 20(1): 42-44.

(本文编辑 郭雪珍)

~~~~~

(上接第23页)

#### 参考文献:

- [1] 王美茹, 谢善文, 郭科, 等. 新型消浪块体的开发与研究[G]//中国土木工程学会. 中国土木工程学会第十届年论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 431-435.
- [2] 吴永强, 李炎保, 刘颖辉. 防波堤损坏研究进展及损坏原因浅析[J]. 港工技术, 2008(2): 8-11.
- [3] Shigeo T, Ken-iChiro S, Katsutoshi K, et al. Typical failures of composite breakwaters in Japan[C]. 27th ICCE. Virginia: ASCE, 2000: 1 899-1 910.
- [4] 李楠. 基于物理模型试验的斜坡式防波堤护面块体稳定性研究[J]. 水运工程, 2012(2): 8-10.
- [5] 吴中, 林民标, 杨越. 斜坡堤天然块石护脚的稳定性计算[J]. 海洋工程, 2002, 20(2): 19-23.
- [6] JTJ 213—1998 海港水文规范[S].
- [7] JTJ/T 234—2001 波浪模型试验规程[S].
- [8] 俞聿修, 柳淑学, 朱传华. 多向不规则波作用下斜坡式建筑物护面块体的稳定性[J]. 海洋学报, 2002, 24(4): 92-104.
- [9] 白银战, 庄正勇. 港口工程中扭王字块应用标准的比较[J]. 水运工程, 2005(11): 36-39.
- [10] JTJ 298—1998 防波堤设计与施工规范[S].

(本文编辑 武亚庆)